POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

DIGESTORI ANAEROBICI TUBOLARI SEMPLIFICATI PER PICCOLE COMUNITÀ RURALI: MODELLO TERMICO DI OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI COSTRUTTIVI E GESTIONALI DELL'IMPIANTO DI VILCABAMBA IN PERÙ

Relatore: Prof. Mario Grosso

Correlatori: Prof. Federico Viganò

Ing. Davide Scaglione

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Ivan Balzaretti

Matricola: 765875

Anno Accademico 2012 – 2013

Ringraziamenti

Innanzi tutto voglio ringraziare il Professor Mario Grosso per la fiducia riposta in me e senza il quale non avrei mai potuto prendere parte ad una esperienza unica ed irripetibile che ha positivamente stravolto la mia vita ed il mio modo di pensare e di approcciarmi alle tematiche scientifiche ed ambientali, ad una diversa lingua e ad una diversa cultura. Grazie a questa esperienza sono tornato a casa convinto del fatto che non vi sia una cultura od una società migliore o peggiore di un'altra, ma semplicemente una moltitudine di possibili chiavi di lettura della vita, delle relazioni e dei valori su cui una popolazione decide di fondarsi.

Ringrazio AIAT per avermi sponsorizzato e sovvenzionato e per aver sempre lavorato dietro le quinte a supporto del progetto e delle difficoltà tecniche che ho incontrato.

Ringrazio Apurimac Onlus per aver curato l'organizzazione del progetto in tutti i suoi aspetti, comprese le esigenze di ogni natura del personale volontario.

Ringrazio il personale amministrativo della "Casa dei volontari di Cuzco" presso la quale sono stato ospite per 2 mesi, sentendomi accolto e rispettato come se fosse stata da sempre la mia casa.

Ringrazio il personale tecnico e non specializzato con cui ho avuto il piacere di collaborare, condividendo conoscenza e cultura, difficoltà in campo seguite da grandi soddisfazioni per l'esito complessivamente positivo del progetto.

Ringrazio il Professor Federico Viganò che si è sempre dimostrato disponibile ad offrire tutto il suo aiuto e le sue competenze tecniche e didattiche per consentirmi di elaborare il modello termico, cuore scientifico della tesi.

Ringrazio l'Ingegner Davide Scaglione, per aver curato la redazione della tesi nel suo complesso, e per non avermi mai fatto sentire solo durante il lungo e tortuoso percorso di lavoro che questa tesi ha comportato.

Voglio inoltre ringraziare con particolare affetto tutta la mia Famiglia, senza il cui sostegno economico, psicologico ed emotivo non avrei mai potuto arrivare alla linea di questo traguardo tanto atteso, ripagandoli solo regalando loro un piccolo motivo per essere orgogliosi di me. In particolar modo voglio dedicare questa tesi alla mia nonna Emilia, che mi ha ospitato presso la sua abitazione per tutta la durata dei miei studi, senza mai farmi mancare nulla e senza mai farmi pesare il ritardo accumulato durante il percorso formativo.

Rigrazio anche tutti i miei Amici, sia quelli di sempre, come Stefano, Mattia, Jacopo e Giovanni, sia tutti i compagni di corso con cui nell'arco del quinquennio ho condiviso tante bellissime emozioni. Non avrei desiderato incontrare altre persone se non tutti loro.

Infine, *last but not least*, voglio ringraziare in modo particolare Danila, la mia fidanzata e amica e compagna di corso, con cui ho condiviso gioie, fatiche, soddisfazioni e delusioni, sempre cercando di sostenerci l'uno con l'altra attraverso un cammino di crescita iniziato proprio sui banchi universitari il 18 Settembre 2006. L'opportunità di condividere gli anni del Politecnico ci ha permesso di fortificare il nostro rapporto e di vivere con più spensieratezza anche i periodi di maggiore tensione.

Abstract

Lo scopo di questa tesi è studiare il comportamento termico dell'impianto al fine di valutare possibili soluzioni progettuali alternative e, loddove fosse possibile, quantificare il beneficio che si trarrebbe apportando degli accorgimenti al design del digestore tubolare in materiale plastico, installato nel sito oggetto di studio (Vilcabamba, Grau, Apurimac, Perù). Allo stato attuale, il digestore, si presenta come una struttura a serra. Il digestore propriamente detto, ovvero il reattore, è costituito da un tubo in geomembrana di PVC, del diametro di circa 1.4 m, alloggiato all'interno di una fossa scavata nel terreno, fino ad una profondità di circa 1 m. Tale fossa è stata opportunamente impermeabilizzata con un rivestimento interno in LDPE ed isolata termicamente dal terreno circostante, ponendo uno strato di PS (polistirene espanso) dello spessore di 10 cm, su ogni parete della medesima. È da notare che la geometria della fossa è di tipo trapezoidale, con le pareti laterali inclinate di un angolo di circa 15° dalla verticale. Tale configurazione, fin quì descritta, non potrebbe funzionare adeguatamente a causa degli sbalzi termici notevoli che caratterizzano la Regione Andina, e per il rischio di danneggiamento ed usura prematura della geomembrana. Per ovviare ad entrambe queste limitazioni, è stato adottato un accorgimento costruttivo, che prevede l'installazione di una struttura modi-serra a riparo del reattore e che contribuendo a ridurre le perdite di calore verso l'esterno, favorisca il mantenimento di un regime di temperatura il più costante possibile. L'attività metabolica delle popolazioni batteriche coinvolte nelle reazioni che costituiscono il processo di digestione anaerobica, è infatti ottimizzata alle alte temperature (condizioni di mesofilia e termofilia) e laddove siano minimizzate le oscillazioni termiche e gli shock termici, ovvero delle variazioni considerevoli e repentine.

Il primo passo della analisi è stato quello di elaborare un modello termico e calibrarlo in modo tale che possa ragionevolmente simulare gli scambi di calore che avvengono tra il sistema e l'ambiente circostante, e tra le diverse parti del sistema stesso. Il passo successivo è stato quello di implementare il modello in funzione di alcuni parametri costruttivi e gestionali, andando a variare i quali, si potrebbe massimizzare la temperatura dello slurry contenuto nel reattore.

1. Il mondo della cooperazione internazionale ***pag. 1***

1.1. Tecnologie Appropriate *pag. 1*
1.2. Aiuto allo sviluppo *pag. 4*
1.3. Cooperazione allo sviluppo *pag. 5*
1.4. Organizzazione non lucrativa di utilità sociale *pag. 5*
1.5. Organizzazione non governativa *pag. 7*
1.6. Apurimac Onlus *pag. 8*
1.7. Inquadramento territoriale ed ambientale: la regione dell'Apurimac *pag. 12*
1.7.1. Aspetti ambientali *pag. 14*
1.7.2. Estrazione mineraria *pag. 14*
1.8. Descrizione del progetto di cooperazione *pag. 16*

2. Digestione anaerobica di reflui agro-zootecnici ***pag. 18***

2.1. Introduzione al processo *pag. 18*
2.2. Le fasi del processo *pag. 19*
2.2.1. Idrolisi *pag. 22*
2.2.2. Acidogenesi *pag. 22*
2.2.3. Acetogenesi *pag. 24*
2.2.4. Metanogenesi *pag. 24*
2.3. Parametri di processo *pag. 26*
2.3.1. Temperatura *pag. 26*
2.3.2. pH *pag. 27*
2.3.3. Agitazione *pag. 28*
2.3.4. Ammoniaca *pag. 28*
2.3.5. Acidi grassi volatili a catena corta *pag. 29*
2.3.6. Acidi grassi a catena lunga *pag. 29*
2.3.7. Composti tossici *pag. 29*
2.4. I parametri di funzionamento *pag. 31*
2.4.1. HRT (Hydraulic Retention Time) *pag. 31*
2.4.2. OLR (Organic Loading Rate) *pag. 31*
2.4.3. Dimensione delle particelle *pag. 32*
2.4.4. Rapporto C:N (carbonio:azoto) *pag. 32*
2.5. Tecniche di miglioramento del processo di digestione anaerobica *pag. 33*
2.5.1. Uso di additivi *pag. 35*
2.5.2. Ceppi microbici *pag. 36*
2.5.3. Inoculo di biomassa nel digestore e ricircolo del digestato *pag. 36*
2.5.4. Tecniche di installazione per ottenere condizioni di temperatura ottimali *pag. 36*
2.5.5. Pretrattamenti ed ottimizzazione dei parametri *pag. 37*

2.6. Il biogas *pag. 40*
2.7. Biomasse avviabili a digestione anaerobica *pag. 41*
2.7.1. Reflui di allevamenti suinicoli *pag. 42*
2.7.2. Reflui di allevamenti bovini *pag. 43*
2.7.3. Scarti dell'agro-industria *pag. 44*
2.8. Tipologie di impianto *pag. 46*
2.8.1. Processi batch *pag. 46*
2.8.2. Processi in continuo *pag. 47*
2.8.3. Contenuto di solidi *pag. 49*
2.8.4. Numero di stadi *pag. 50*
2.9. Il digestato *pag. 51*
2.9.1. Caratteristiche agronomiche del digestato *pag. 52*
2.10. Abbattimento dei cattivi odori *pag. 53*
2.11. Effetto sul contenuto di patogeni *pag. 54*
2.12. Impianti a biogas domestico nei Paesi in via di sviluppo *pag. 55*

3. Materiali e metodi ***pag. 60***

3.1. Introduzione alla tecnologia dei digestori tubulari in materiale plastico: PTD "Plastic Tubular Digester" *pag. 60*
3.2. Caratteristiche del digestore tubulare *pag. 62*
3.2.1. Tipo di alimentazione *pag. 62*
3.2.2. Tipo di flusso *pag. 62*
3.2.3. Disposizione *pag. 63*
3.2.4. Agitazione *pag. 63*
3.2.5. Materiali impiegati per la costruzione *pag. 64*
3.2.6. Installazione e costi *pag. 67*
3.2.7. Uso e manutenzione *pag. 68*
3.3. Procedimento per la progettazione di un digestore di tipo tubulare plug-flow *pag. 69*
3.4. Fasi costruttive di un digestore tubulare "plug-flow" di basso costo *pag. 76*
3.4.1. Ubicazione *pag. 76*
3.4.2. Scavo della fossa di alloggiamento del digestore *pag. 76*
3.4.3. Scavo di consolidamento del terreno di fondazione per le pareti della struttura portante del tetto *pag. 77*
3.4.4. Elevazione delle pareti della struttura della serra *pag. 78*
3.4.5. Isolamento *pag. 80*
3.4.6. Gonfiaggio del digestore *pag. 80*
3.4.7. Posizionamento del digestore nella fossa *pag. 81*
3.4.8. Riempimento del digestore con acqua *pag. 82*

3.4.9. Carica del digestore *pag. 82*
3.4.10. Installazione delle tubazioni di collettamento del biogas *pag. 83*
3.4.11. Installazione della valvola di sicurezza *pag. 84*
3.4.12. Installazione della "trappola dell'acqua" *pag. 84*
3.4.13. Installazione del filtro per la rimozione dell'idrogeno solforato *pag. 85*
3.4.14. Costruzione del tetto della serra *pag. 86*
3.4.15. Installazione del gasometro *pag. 87*
3.4.16. Installazione del contatore del gas, del manometro e dei bruciatori *pag. 88*
3.4.17. Realizzazione dei pozzetti di carico e scarico *pag. 89*
3.4.18. Realizzazione di un dispositivo per l'agitazione *pag. 89*
3.5. Presentazione del piano di monitoraggio *pag. 90*
3.5.1. Informazioni di ordine organizzativo *pag. 90*
3.5.2. Attività di monitoraggio in campo *pag. 90*

4. Analisi termica dell'impianto semplificato di digestione anaerobica ***pag. 94***

4.1. Introduzione alla teoria della trasmissione del calore *pag. 94*
4.2. Modalità di trasmissione del calore *pag. 94*
4.2.1. Conduzione *pag. 95*
4.2.2. Convezione *pag. 95*
4.2.3. Irraggiamento *pag. 97*
4.3. Implementazione del modello di scambio termico *pag. 98*
4.4. Calcolo dei percorsi solari e degli angoli di incedenza sulle superfici del sistema *pag. 100*
4.4.1. L'angolo di declinazione solare δ *pag. 101*
4.4.2. Angolo orario ω *pag. 102*
4.4.3. Altezza del Sole β *pag. 103*
4.4.4. Angolo azimutale solare Ψ *pag. 104*
4.5. Radiazione incidente sulle superfici esterne della serra *pag. 105*
4.6. Radiazione incidente sulle superfici interne della serra *pag. 106*
4.6.1. Componente diretta della radiazione incidente sulle superfici interne *pag. 107*
4.6.2. Componente diffusa della radiazione incidente sulle superfici interne *pag. 109*
4.6.3. Componente riflessa della radiazione incidente sulle superfici interne *pag. 112*
4.7. Trasferimento di calore per irraggiamento tra le diverse superfici interne alla serra *pag. 112*

4.8. Trasferimento di calore per irraggiamento tra le superfici esterne e l'ambiente *pag. 113*
4.9. Trasferimento di calore convettivo tra le superfici e l'aria *pag. 114*
4.10. Trasferimento di calore conduttivo tra il suolo e lo slurry *pag. 116*
4.11. Dinamica dei fenomeni di scambio termico all'interno del reattore *pag. 118*
4.12. Calcolo dei bilanci energetici per le singole parti del sistema *pag. 121*

5. Analisi dei risultati e conclusioni ***pag. 126***

5.1. Analisi del modello di radiazione solare *pag. 126*
5.2. Radiazione solare assorbita dalle diverse superfici costituenti il sistema *pag. 129*
5.3. Analisi delle diverse forme di assorbimento della radiazione solare durante l'anno *pag. 144*
5.4. Analisi della calibrazione del modello *pag. 145*
5.5. Temperature degli elementi del digestore *pag. 148*
5.6. Proposte di miglioramento *pag. 150*
5.6.1. Ottimizzazione dei parametri costruttivi e gestionali *pag. 150*
5.6.2. Analisi delle perdite di calore dal sistema verso l'ambiente esterno *pag. 153*
5.6.3. Modifiche del disegno e dello schema di impianto *pag. 153*
5.7. Conclusioni *pag. 159*

Allegati ***pag. 162***

Allegato A1: sensori e apparecchiature installate ed impiegate per il monitoraggio *pag. 162*

Allegato A2: diagrammi dei percorsi solari *pag. 166*

Allegato A3: caratteristiche meteo-climatiche dell'area oggetto di studio *pag. 178*

Allegato A4: schema dell'impianto *pag. 181*

Riferimenti bibliografici ***pag. 182***

1. Il mondo della cooperazione internazionale

1.1. Tecnologie Appropriate

La tecnologia è la soluzione ad un bisogno umano che nasce dalla simultanea compresenza di uomini, attrezzature impiegate, ambiente naturale e organizzazione produttiva. Possiamo quindi definire una qualsiasi risposta ad una esigenza umana, cioè una tecnologia, dal punto di vista sociale, economico, ecologico e politico. Le tecnologie appropriate sono perciò quelle risposte ai bisogni fondamentali dell'umanità che:

- socialmente migliorano le condizioni di vita della gente;
- economicamente usano in maniera saggia le risorse del pianeta;
- ecologicamente rispettano gli equilibri e le leggi della natura;
- politicamente decentrano fra la gente il governo della cosa pubblica.

Bisogni essenziali comuni e generalizzati, quali il lavoro della terra, la produzione di beni e servizi, l'abitare, lo spostarsi, il vestire, il mangiare, il comunicare e tanti altri hanno avuto storicamente e in luoghi diversi risposte e quindi tecnologie più o meno appropriate. Per tecnologia si intende "conoscenza umana applicata alla produzione", ossia quell'insieme di informazioni necessarie per trasformare materie prime, semilavorati e ore di lavoro (input) in nuova produzione (output). Queste informazioni comprendono sia le istruzioni scritte, in forma di letteratura tecnica, manuali, disegni, ecc., sia la conoscenza pratica richiesta per utilizzare efficacemente le istruzioni (know-how). Si ha innovazione tecnologica quando è possibile ottenere una stessa quantità di output con minori quantità di input (innovazione di processo) o un output di qualità nuova (innovazione di prodotto). L'innovazione di processo può risparmiare uno o più input, ma storicamente le innovazioni hanno teso, in aggregato, a risparmiare lavoro. La tecnologia contribuisce, insieme alla quantità disponibile di lavoro, di capitale fisico e di risorse ambientali, a determinare il livello e la composizione potenziali della produzione di una economia. In tal caso, la tecnologia adottata tende ad essere anche la più efficiente, in virtù delle spinte provenienti dalla competitività di prezzo fra le imprese. L'innovazione tecnologica costituisce uno degli elementi-chiave dell'aumento del reddito pro-capite e della crescita economica. In questo caso le spinte provengono dalla competitività di prodotto fra le imprese, che consente loro di esercitare, in una certa misura, un potere di mercato. I fattori che determinano la tecnologia sono dati sia dal livello della scienza e della tecnica (invenzioni) che è stato raggiunto in ogni determinato momento storico, sia dalla capacità umana di applicare questa conoscenza alle attività produttive. La determinante principale dell'innovazione tecnologica è data dalle aspettative di profitto da parte di coloro che per primi introducono l'innovazione, detti propriamente imprenditori (Josef A. Schumpeter (Austria, 1883-1950)). Le aspettative di profitto sono influenzate dall'efficacia dei diritti di proprietà (brevetti) che ostacolano l'imitazione tecnologica. L'introduzione dell'innovazione può essere vincolata dalla disponibilità finanziaria. Infatti, il rischio connesso al successo

dell'innovazione è a carico di chi la finanzia. La tecnologia migliora anche con l'aumento dell'esperienza nella attività produttiva, detto learning-by-doing (imparare facendo) (K.J. Arrow (Stati Uniti, 1921)).

Gli effetti principali dell'innovazione tecnologica sui settori produttivi sono costituiti dalla diffusione e dalla concentrazione. Nel primo caso prevale l'imitazione della nuova tecnologia, con la conseguenza di erodere il vantaggio competitivo dei primi imprenditori. Nel secondo caso prevale l'appropriazione delle nuove tecnologie da parte di una o di poche imprese. Questo caso è dovuto a possibili vantaggi derivanti da una sistematica attività di ricerca (investimenti in ricerca e sviluppo) che permette di aumentare le probabilità di successo delle innovazioni. Storicamente il secondo caso è cresciuto di importanza, ed oggi si stima che gli investimenti in ricerca e sviluppo abbiano un ruolo determinante per la crescita delle economie maggiormente industrializzate. Il primo caso, tuttavia, continua ad essere di rilievo, come testimonia la presenza di tante piccole imprese di successo in Italia e non solo. Gli effetti delle innovazioni tecnologiche per l'intero sistema economico riguardano la crescita e la composizione della produzione di una economia e la sua occupazione. Infatti, le innovazioni tecnologiche possono aumentare la quantità e migliorare la qualità della produzione, oppure ridurre il lavoro impiegato (disoccupazione tecnologica). Prevale il primo effetto se gli aumenti dell'efficienza e di qualità stimolano sufficientemente la domanda di nuova produzione, altrimenti l'occupazione si riduce. Visto il ruolo fondamentale che il progresso tecnico ha avuto per i paesi industrializzati, una delle visioni più consolidate del problema della povertà ne vede la causa principale nella "arretratezza tecnologica", accompagnata da una limitata espansione del settore industriale dell'economia. La soluzione più appropriata è vista nella industrializzazione, e in particolare una forte accumulazione di capitale fisico; trasferimento nei paesi poveri di tecnologie avanzate.

Questi piani di sviluppo tradizionali, adottati tra il 1950 e il 1980 hanno spesso dato risultati insoddisfacenti, soprattutto in America Latina e in Africa. Lo studio dei casi in cui questi interventi hanno fallito, ha messo in luce aspetti più complessi e profondi del ruolo della tecnologia. L'aspetto più interessante è la comprensione del fatto che la tecnologia non è una proprietà delle macchine ma un prodotto della conoscenza umana. Gli effetti dell'uso delle macchine, e a maggior ragione la capacità di creare innovazioni tecnologiche, non dipendono tanto dal capitale fisico quanto dal capitale umano. Questo concetto è oggi in primo piano negli studi sulla crescita economica e nei nuovi piani di sviluppo. Esso ha spostato l'accento sui fattori immateriali della crescita, in particolare sulla formazione della popolazione e la sua qualità di vita e di lavoro.

L'idea di tecnologie appropriate ha origine nella concezione Gandhiana di sviluppo; Gandhi ritiene che la tecnologia non deve creare forme di sfruttamento degli esseri umani, né a livello internazionale né a livello nazionale, e tanto meno, a livello locale, fra città, campagna e villaggi. Per questo Gandhi, nel suo impegno per rendere indipendente l'India

dall'impero britannico, propone tecnologie a piccola scala, sistemi cooperativi e produzioni di beni e servizi di cui gli uomini abbiano veramente bisogno. Le macchine, secondo Gandhi, devono sì aumentare la produzione, purché ciò non contrasti con la dignità dell'uomo.

I popoli che non hanno sviluppato tecnologie proprie incontrano oggettive difficoltà nell'importare ed utilizzare le tecnologie dei paesi più sviluppati. Esperienze relative alla industrializzazione dei paesi e delle regioni emergenti mostrano che le tecnologie proposte non sempre rispondono in maniera adeguata alle esigenze reali delle regioni e delle popolazioni. Vi è un vuoto tra gli obiettivi che si propone l'industria (minimizzazione dei costi di produzione, massimizzazione della produttività) e le esigenze reali delle regioni e delle loro popolazioni. Il riconoscimento di questa separatezza tra fra le esigenze di sviluppo economico e sociale di una regione e le esigenze di razionalità economica e organizzativa ha portato a definire il concetto di appropriatezza della tecnologia.

Dobbiamo ritenere che una tecnologia sia appropriata quando, per effetto della sua struttura e dei rapporti che riesce a stabilire con la cultura, l'ideologia, la struttura sociale del paese in cui viene adottata, dà origine a processi che si autosostengono e riescono a far crescere le attività del sistema e la sua autonomia. In altre parole, si tratta di far aumentare la capacità di sopravvivenza e di sviluppo della popolazione che la adotta. Ne consegue, data la varietà delle condizioni al contorno, che non esiste uno schema valutativo della appropriatezza di una tecnologia applicabile sempre e comunque. In un certo ambiente, un rapido sviluppo economico conseguente alla applicazione di una nuova tecnologia può avere effetti dirompenti sul tessuto sociale, quali l'abbandono delle attività agricole, l'inurbamento, il rallentamento dei vincoli familiari. In altri casi, questo non avviene.

Nella letteratura anglosassone sono presenti due concetti: la tecnologia leggera (soft technology) e la tecnologia a basso costo (low cost technology). La tecnologia leggera non è sempre identificabile con una tecnologia appropriata: il termine indica una tecnologia solitamente a basso impatto ambientale, in quanto largamente basata su procedure informatiche, certo difficilmente utilizzabili dagli abitanti dei paesi in via di sviluppo. La tecnologia a basso costo invece è più frequentemente una tecnologia appropriata, anche se non sempre si identifica con essa.

Le tecnologie possono essere caratterizzate attraverso una serie di fattori.

- Intensità e tipo di lavoro. In certi casi una tecnologia può essere appropriata quando è technology-intensive e richiede personale di buona qualificazione: sarà quindi appropriata, in questo caso, rispetto ad aree nel quale è presente una forza-lavoro a buon livello culturale. In altri casi invece, di maggiore interesse per noi, una tecnologia, per essere appropriata, deve essere labour-intensive, cioè tale da determinare un ottimale utilizzo delle risorse umane locali, adeguandosi alla cultura locale.

- Uso razionale delle risorse naturali. Non è razionale l'abitudine di bruciare aree forestali per ricavarne, nel breve periodo, terreni coltivabili; non è razionale la deforestazione realizzata per ricavarne legname da ardere, cioè una fonte di energia. In questo quadro si inserisce il recupero dai rifiuti.
- Decentramento delle attività sul territorio. La valorizzazione delle risorse umane e delle risorse naturali e la tutela dell'ambiente sono maggiori se capitale e lavoro vengono suddivisi in aree relativamente piccole. Si pensi, per contrasto, alla negatività delle megalopoli che si sono formate in India, Brasile ed altri Paesi del Sud America.
- Pluralismo tecnologico. Sembra opportuno individuare, ove possibile, diverse soluzioni per uno stesso problema tecnologico; questo presenta il vantaggio di rendere meno vulnerabile la struttura produttiva.

1.2. Aiuto allo sviluppo

L' aiuto allo sviluppo (anche Aiuto Estero, Assistenza Tecnica) è una forma di aiuto fornita da governi ed altre agenzie a sostegno dello sviluppo economico, sociale e politico dei paesi in via di sviluppo.

Si distingue dall'aiuto umanitario poiché punta ad alleviare la povertà nel lungo termine, più che le sofferenze nel breve termine. La maggior parte dell'aiuto allo sviluppo viene dai paesi industrializzati (cooperazione Nord-Sud), ma anche alcuni paesi meno ricchi contribuiscono (cooperazione Sud-Sud).

L'aiuto può essere:

- Bilaterale (70%): da un paese ad un altro, direttamente
- Multilaterale (30%): dal paese donatore ad organizzazioni internazionali quali la Banca Mondiale o le agenzie delle Nazioni Unite, che lo ridistribuiscono tra i paesi in via di sviluppo.

Circa l'80-85% dell'aiuto allo sviluppo viene da fonti governative (Aiuto Pubblico allo Sviluppo). Il restante 15-20% viene da organizzazioni private (ONG), senza contare le rimesse inviate da migranti individuali ai propri familiari nei paesi in via di sviluppo.

Alcuni governi tendono ad includere l'assistenza militare nella nozione di "aiuto estero", benché molte ONG disapprovino tale definizione.

1.3. Cooperazione allo sviluppo

La cooperazione allo sviluppo nasce governativa dopo il secondo conflitto mondiale con le prime conferenze delle Nazioni Unite; dalla fine del XX secolo viene affiancata e sostenuta grazie a un forte sistema di valori, da quella non governativa, legittima rappresentanza della società civile.

La cooperazione governativa si occupa del trasferimento di risorse finanziarie, assistenza tecnica, servizi e beni da un governo o da un organo pubblico di un Paese sviluppato a favore di un paese in via di sviluppo (PVS), mentre la cooperazione non governativa è maggiormente slegata da interessi politico-economici particolari e rappresenta il canale privilegiato delle istanze provenienti dalla società civile. Recentemente nuovi soggetti associativi hanno configurato una forma di cooperazione detta decentrata, che si basa sul contatto diretto tra due comunità con obiettivi comuni, e che quindi collabora con la tradizionale forma di cooperazione.

In Italia, la Cooperazione allo Sviluppo è parte integrante della politica estera italiana ed è gestita dalla Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo del Ministero degli Affari Esteri. Nel definire iniziative e Paesi in cui intervenire, la Cooperazione italiana tiene conto di linee guida e impegni concordati nel più ampio contesto internazionale (ONU, UE). In termini di priorità le iniziative sono focalizzate principalmente sul continente africano (Africa sub-sahariana), sui Paesi nei quali sono stati assunti importanti impegni internazionali (Afghanistan, Libano) nonché in aree nelle quali la presenza del nostro Paese ha radici profonde (America Latina, Medio Oriente e Mediterraneo). In termini di aree tematiche e settori le priorità sono: l’ambiente e beni comuni, con particolare attenzione allo sviluppo rurale, all’agricoltura biologica o convenzionale, alla ricerca di fonti alternative e rinnovabili; le politiche di genere e in particolare l’empowerment delle donne, accanto ai tradizionali interventi sulla salute e sull’educazione.

1.4. Organizzazione non lucrativa di utilità sociale

Nell'ordinamento italiano l'espressione organizzazione non lucrativa di utilità sociale, meglio nota con l'acronimo ONLUS, indica una categoria tributaria alla quale, secondo l'art. 10 del D.Lgs. 4 dicembre 1997, n. 460, appartengono determinati enti di carattere privato, anche privi di personalità giuridica, i cui statuti o atti costitutivi rispondono ai requisiti elencati nello stesso articolo. L'appartenenza a tale categoria attribuisce la possibilità di godere di agevolazioni fiscali.

I soggetti che possono assumere la qualifica di ONLUS sono:

- le associazioni riconosciute e non riconosciute;
- i comitati;
- le fondazioni;
- le società cooperative;
- gli altri enti di carattere privato, con o senza personalità giuridica.

Al fine di acquisire la qualifica di ONLUS è necessario che lo statuto o l'atto costitutivo dell'ente, redatto nella forma dell'atto pubblico o della scrittura privata autenticata o registrata, prevedano espressamente:

- lo svolgimento di almeno una delle seguenti attività:
    - assistenza sociale e socio sanitaria;
    - assistenza sanitaria;
    - beneficenza;
    - istruzione;
    - formazione;
    - sport dilettantistico;
    - promozione e valorizzazione dei beni culturali;
    - tutela e valorizzazione dell'ambiente;
    - promozione della cultura e dell'arte;
    - tutela dei diritti civili;
    - ricerca scientifica di particolare interesse sociale;
- l'esclusivo perseguimento di finalità di solidarietà sociale;
- il divieto di svolgere attività diverse da quelle sopra menzionate, ad eccezione di quelle ad esse direttamente connesse;
- il divieto di distribuire, anche in modo indiretto, utili e avanzi di gestione nonché fondi, riserve o capitale durante la vita dell'organizzazione, a meno che la destinazione o la distribuzione non siano imposte per legge o siano effettuate a favore di altre ONLUS che per legge, statuto o regolamento fanno parte della medesima ed unitaria struttura;
- l'obbligo di impiegare gli utili o gli avanzi di gestione per la realizzazione delle attività istituzionali e di quelle ad esse direttamente connesse;
- l'obbligo di devolvere il patrimonio dell'organizzazione, in caso di suo scioglimento per qualunque causa, ad altre organizzazioni non lucrative di utilità sociale;
- l'obbligo di redigere il bilancio o rendiconto annuale;
- l'obbligo di manifestare una rigida trasparenza gestionale non omettendo alcun requisito di bilancio.

1.5. Organizzazione non governativa

Le organizzazioni non governative, in sigla ONG, in Italia sono delle particolari ONLUS che concentrano la loro attività nella cooperazione allo sviluppo e che sono riconosciute dal Ministero degli Affari Esteri ed inserite in una specifica lista.

Più in generale, sono organizzazioni indipendenti dai governi e dalle loro politiche e generalmente, anche se non sempre, si tratta di organizzazioni non aventi fini di lucro (non profit) che ottengono almeno una parte significativa dei loro introiti da fonti private, per lo più donazioni. Nel mondo anglosassone vengono spesso identificate con la sigla PVO (di private voluntary organization), preferita a NGO (sigla di non-governmental organization).

Le ONG operano per scopi di diverso tipo, tipicamente per portare avanti le istanze politico-sociali dei propri membri, spesso trascurate dai governi. Alcuni esempi sono: il miglioramento dell'ambiente, l'incoraggiamento dell'osservazione dei diritti umani, l'incremento del benessere per le fasce di popolazione meno benestanti, o per rappresentare un'agenda corporativa, ma ci sono tantissime organizzazioni e i loro scopi coprono un'ampia gamma di posizioni politiche e filosofiche. Tipicamente fanno parte del movimento ecologista, pacifista, laburista/progressista o dei popoli indigeni, e non sono affiliate formalmente ad alcun partito politico o punto di vista che non siano i diritti umani o la pace o l'ecologia o la tolleranza. Alcune ONG sono coperture di gruppi politici o religiosi ma queste hanno minore credibilità globale.

Le ONG di cooperazione allo sviluppo sono libere associazioni, create da privati cittadini che, per motivazioni di carattere ideale o religioso, intendono impegnarsi a titolo privato e diretto, per dare un contributo alla soluzione dei problemi del sottosviluppo, principalmente quelli del Sud del mondo. Queste, non avendo fonti di finanziamento istituzionali, ed essendo per statuto senza finalità di lucro, in ragione della filosofia umanitaria e sociale che le anima, realizzano le loro attività grazie a finanziamenti esterni; si basano comunque anche sull'apporto di lavoro volontario, gratuito o semigratuito, offerto da membri e simpatizzanti.

I due caratteri essenziali per definire un'organizzazione non governativa di cooperazione allo sviluppo, sono quindi costituiti dal carattere privato, non governativo dell'associazione, e da quello dell'assenza di profitto nell'attività.

1.6. Apurimac Onlus

"Apurimac onlus è nata nel 1992, per affiancare la missione agostiniana italiana che opera dal 1968 nella regione peruviana dell'Apurimac, dalla quale abbiamo preso il nome. Il nostro lavoro è iniziato sulle Ande, a 4.000 metri di altezza, estendendosi poi alle città di Cuzco e Lima. La regione dell'Apurimac è caratterizzata da un estremo isolamento geografico ed economico. La popolazione locale sopravvive solo grazie ad un'economia di sussistenza, mancando sia vie di comunicazione sia capitali e tecnologie utili per lo sfruttamento delle ricchezze del sottosuolo. Tali disagi, insieme ad un alto tasso di analfabetismo e a precarie condizioni igienico - sanitarie, sono le principali piaghe che ci siamo impegnati a curare.

Dal 2003, con il riconoscimento di ONG (Organizzazione Non Governativa) da parte del Ministero degli Affari Esteri, siamo giunti fino in Africa, con lo stesso obiettivo guida, ovvero sostenere i progetti di sviluppo delle missioni agostiniane che lavorano per il Sud del mondo.

Quando siamo partiti nel 1992, la nostra meta erano le cime più alte del Perù più povero.

Ci siamo andati, al fianco dei missionari agostiniani, per prenderci cura di chi non aveva una casa, una scuola, un lavoro. A volte, anche una famiglia. E da allora, abbiamo creato una rete di assistenza e solidarietà fatta di cose concrete. Persone esperte e volontari, religiosi e laici, insegnanti, medici, infermieri e ingegneri, a dare vita a progetti che avessero un inizio e una fine.

E alla fine, in alto ci siamo rimasti. Con il cuore, la volontà e un grande obiettivo: non perdere mai di vista chi sta più in basso di noi. Chi vive tra miseria e crudeltà, chi non ha mai visto un filo di speranza alzarsi nel deserto che gli è attorno".

(Apurimac Onlus con le aziende Venerdì, 28 settembre 2012)

1.7. Inquadramento territoriale ed ambientale: la regione dell'Apurimac

L’Apurimac è una regione del Perù che sta nel cuore delle Ande su una superficie di 20.892 km^2, quasi come l’Emilia Romagna, dove 490.000 abitanti vivono tra il capoluogo Abancay e piccoli centri abitati a più di 3.000 metri di altezza. Il dipartimento dell’Apurimac è diviso in 7 province (vedi Figura 1.1).

Dal 1968, i missionari agostiniani operano per lo sviluppo del popolo Quechua nelle Tre Province Alte che formano la Prelatura di Chuquibambilla: Grau, Cotabambas e Antabamba, tra le più povere di tutto il Perù. Oltre 80.000 persone di lingua quechua vivono fino a 5.000 metri d’altezza. Geograficamente isolati, la lontananza dal mare e dalla foresta amazzonica costringe gli apurimeñi a una vita dura di agricoltura e pastorizia, priva di strade e di efficienti servizi basilari come educazione, salute, energia elettrica, telefono, acqua.

Chiunque abbia bisogno di cure mediche, deve pagare. I giovani non possono formarsi al lavoro. Il tasso di mortalità infantile delle Tre Province Alte è superiore a quello registrato in tutto il dipartimento dell’Apurimac dal rapporto UNICEF peruviano, che è pari al 119 per mille tra i nati vivi.

Apurimac è derivato dalle parole in lingua quechua, *Apu* = Dio e *Rimak* = l'oratore. Esistono tre diverse interpretazioni:

1. *“Chi parla come un gentiluomo”*. Non è molto convincente poiché in questo caso dovrebbe essere *“Apu rimak jina”*, a meno che il nome venga preso in un senso molto metaforico;
2. *“Il Dio che parla”*. Non avrebbe basi grammaticali, perché questo sarebbe *“Rimak Apu”* in quechua;
3. *“Colui che parla agli dei”* potrebbe riferirsi al rumore assordante che proviene dal fiume che scorre.

La leggendaria cultura Chanka si è sviluppata in questo territorio, soprattutto nella provincia di Andahuaylas. Le loro doti di guerrieri erano al pari delle loro abilità come agricoltori. Furono coinvolti in una sanguinosa lotta contro gli Incas ai quali resistettero a lungo, fino a quando l'esercito di Pachacutec li sconfisse ed integrò tale territorio all’interno del Tahuantinsuyo. Apurímac è stato uno dei pochi posti dove si perfezionò l'agricoltura, una volta che ai suoi abitanti fu imposta una forma efficace e razionale di sfruttamento della terra, impiego di fertilizzanti naturali, rotazione delle colture ed il baratto di prodotti.

Figura 1.1 – Carta politica dell'Apurimac

Attualmente questo dipartimento sta sviluppando il progetto las Bambas mining situato nella Provincia di Cotabambas, che sarà pienamente operativo nell'anno 2014, l'anno in cui questo dipartimento del Perù - uno dei più poveri - riceverà le tasse di licenza mineraria, con la quale si prevede di migliorare il tenore di vita della popolazione in questa parte dimenticata del Perù.

Il paesaggio apurimeño, così contrastante ed estremo, può essere condensato in due parole: bellezza e sfida. Anche se storicamente con il suo isolamento, in tempi moderni, con i cambiamenti nei valori e preoccupazioni ambientali, il paesaggio si trasforma in un attributo con un grande potenziale economico. Montagne, fiumi e altopiani rappresentano una risorsa che pochi posti al mondo possiedono e dovrebbero trasformare quello che fino ad ora sono stati (una sorta di ostacolo alla loro integrazione) in una delle sue principali fonti di ricchezza.

Si può dire che accanto a Huancavelica, Apurímac è il più andino dei dipartimenti del Perù: tutto il suo territorio è montuoso e intervallato di altipiani. In termini generali, Apurímac è all'interno della regione dell'altopiano tra la cordigliera orientale e la cordigliera occidentale. Il dipartimento è caratterizzato dai suoi profondi canyon e valli inter-andine, scolpiti da fiumi, al posto dei quali un tempo vi era una zona più o meno pianeggiante chiamata superficie di Puna.

Figura 1.2 – Vista della vallata del Rio Apurimac, dove sorge il pueblo di Vilcabamba

1.7.1. Aspetti ambientali

La tutela dell’ambiente è un settore molto trascurato in Apurímac; questo è stato certificato dalla scarsità di studi e informazioni sul tema mentre sono molteplici e sempre più gravi i problemi di degrado del paesaggio, acqua, aria e suolo, a seguito di un ammodernamento non sempre ben inteso, intensificazione della pressione economica o investimenti. Uno straziante paradosso dipinge il disinteresse per la crisi ambientale che incombe e che si annida in Perù: da un lato, la costruzione massiccia di magnifici palazzi comunali, parchi e altre opere intraprese da enti pubblici e, dall’altro, l'assenza o l'estrema precarietà di discariche per rifiuti, sistemi di drenaggio e pulizia pubblica (non esiste alcun interramento sanitario, nessun impianto di trattamento acque reflue a livello dipartimentale).

La penetrazione di prodotti industrializzati (contenitori usa e getta, imballaggi, pubblicità) implica un sostanziale aumento nella produzione di rifiuti, la cui raccolta, trattamento e stoccaggio è scarso o quasi inesistente, quindi è comune vedere accumuli di immondizia nei pressi o addirittura dentro le città stesse. A poco a poco, la presenza di rifiuti in plastica, associata alla mancanza di coscienza civica (deficit educativi) e la mancanza di interesse da parte delle autorità su questo problema, si è andata diffondendo anche in zone rurali remote permettendo che praticamente non ci siano più luoghi esenti da contaminanti. Non essendo in progetto discariche, attualmente la raccolta e lo stoccaggio di rifiuti ospedalieri, chimici, batterie ed esplosivi e sostanze infiammabili, avvengono in maniera parziale ed incontrollata. Oltre all'inquinamento chimico, questo comporta un rischio di infezione e intossicazione o avvelenamento.

Figura 1.3 – Cumulo di rifiuti plastici nello scenario montano andino

Le acque reflue non ricevono alcun trattamento e sono scaricate direttamente nei corsi d'acqua superficiali, che si riversano nei fiumi, lagune e paludi. Ciò induce l'inquinamento delle fonti di acqua potabile, e dell'abbeveraggio di bestiame, con la conseguente trasmissione di parassiti e la diffusione di malattie gastrointestinali, cutanee e oculari. Questo facilita anche l'eutrofizzazione dei laghi e delle paludi. L'implementazione di fosse settiche (una buona alternativa per le aree rurali dove le condizioni degli inurbamenti ostacolano l'installazione di sistemi di fognatura) non sempre è accompagnata da una preparazione adeguata, soprattutto nella compattazione del terreno e impermeabilizzazione della vasca, così da generare un impatto inquinante - sulle acque sotterranee (falda) e il terreno circostante - pericoloso per il suo effetto cumulato nel medio e lungo termine. Nelle auto-officine e stazioni di servizio, pratiche di gestione e smaltimento degli idrocarburi sono prive di cura e attenzione, generando grandi macchie di contaminazione che si infiltrano nel sottosuolo tramite un deflusso che trascina oli e combustibili attraverso le insenature, impermeabilizzano il terreno e talvolta raggiungendo i corpi idrici sotterranei e superficiali.

Figura 1.4 – Acque reflue sversate nel recettore senza subire alcun trattamento

L'uso indiscriminato di fertilizzanti chimici, insetticidi e pesticidi produce ripercussioni igienico-sanitarie di varia natura. Questo ha anche influito su alcuni tipi di controllo biologico esercitato da una fauna che si è praticamente estinta, come rospi, serpenti, gufi e barbagianni – cacciati inoltre a causa di assurde superstizioni che li considerano predicatori di morte o di sventura – e che ha favorito la proliferazione di parassiti, roditori e insetti che danneggiano la produzione e la qualità agricola. D'altra parte i fertilizzanti non assimilati dalle piante e terreni vengono dilavati dalle acque di ruscellamento, raggiungendo fiumi e falde acquifere (accumulo di acque sotterranee) o che, scorrendo verso le lagune e zone umide, accelerano i processi di eutrofizzazione.

Data la quantità e dispersione del bestiame è probabile che la produzione incontrollata di metano da questa fonte non sia molto importante. Invece, la forma di allevamento non stabulato, induce un forte inquinamento fecale di suoli e acque: questo porta a catene di contagio, anche per l'uomo. Le lacunose condizioni igieniche portano ad una alta incidenza di malattie parassitarie.

L'importazione di veicoli usati, abbinata alla vetustà e bassa manutenzione del parco veicoli circolanti, ha originato una forte contaminazione da monossido di carbonio e di gas sulfurei. Con le tendenze in voga, questa situazione critica dovrebbe acutizzarsi ancora di più nei prossimi anni.

1.7.2. Estrazione mineraria

I pregiudizi sull'attività mineraria portano ad errori di apprezzamento, con il rischio di trascurare problemi più gravi. Si è pensato che lo sfruttamento minerario su larga scala sia responsabile dei grandi disastri ambientali. Le attività minerarie formali (e di più grande taglia) sono sottoposte a sorveglianza, modelli e certificazioni di sicurezza e ambientali molto esigenti e continui, mentre l'artigiano legato al settore minerario sfugge a tutti i tipi di controllo e i suoi effetti sono, spesso, per l'ambiente più devastanti. Il notevole aumento dei prezzi dei metalli, come rame, ha permesso l'avanzamento dell'estrazione mineraria informale in aree prima impensabili: proliferazione di molte piccole miniere sfruttate in condizioni precarie con un alto grado di rischio per i lavoratori, sia sul piano fisico (incidenti per soffocamento, frane, inondazioni ecc.) che ambientale (esposizione a reagenti chimici ed esplosivi). In assenza di dati, ci si limita a constatare alcuni dei pericoli e danni che genera l'attività mineraria:

- Dumping clandestino di rifiuti di estrazione mineraria ed altri detriti metallurgici in corpi idrici e corsi d'acqua;
- Potenziale rottura o inondazione delle pareti di contenimento;
- Lacerazione o perforazione di geomembrane impermeabili utilizzate nei sottofondi dei depositi di rifiuti e lisciviazione con conseguente fuoriuscita di fluidi pericolosi verso il suolo e i recettori idrici;
- Emissione di polveri dai macchinari per la frantumazione dei minerali;
- Alterazione del regime idrogeologico (migrazione o scomparsa di sorgenti, riduzione dei flussi, ecc.);
- Erosione e modificazione irreversibile del paesaggio.

L'estrazione artigianale dell'oro è la più dannosa, perché implica l'emissione e la perdita di mercurio, cianuro e altri reagenti che oltre ad avvelenare acque e suoli, causano malattie degenerative e incurabili come l'avvelenamento da piombo e il Plutonismo, inducendo anche paralisi e disabilità.

Figura 1.5 – Complesso minerario di Las Bambas

1.8. Descrizione del progetto di cooperazione

Il lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto di cooperazione internazionale coordinato da Apurimac Onlus, con codice AID 9550/APURIMAC/PER e co-finanziato dal Ministero degli Affari Esteri. Il progetto, intitolato *"Energia renovable a partir de biodigestores en Apurimac"*, nasce con l'obiettivo di investigare le possibilità di applicazione della tecnologia della digestione anaerobica per il trattamento di reflui zootecnici, per soddisfare le esigenze energetiche della popolazione rurale della regione Andina del Perù.

Il progetto si prefigge di realizzare una decina di piccoli impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas, distribuiti omogeneamente sul territorio provinciale di Grau (Apurimac, Perù), con l'obiettivo di sopperire alla mancanza di fonti energetiche pulite a basso costo. Al momento le fonti primarie impiegate per la cottura dei cibi e la generazione di calore nell'ambito domestico, sono le biomasse legnose, le quali, secondo uno studio condotto dalla Organizzazione Mondiale della Sanità, sono una delle fonti principali di malattie respiratorie e di mortalità nelle famiglie contadine. Al contempo, parte del biogas prodotto, sarà impiegato per la produzione di energia elettrica per altri usi domestici, mediante un motore a combustione, adattato per il funzionamento a biogas.

Inizialmente le attività sono state concentrate nella località di Vilcabamba, con l'installazione di due impianti (Figura 1.6). Al momento del mio coinvolgimento, il progetto era in fase di avviamento; il primo impianto semplificato era stato completato ed era entrato in funzione, con buoni risultati.

- A partire dal primo digestore installato, produrre biogas utilizzabile come combustibile alternativo alle biomasse ligno-cellulosiche per la cottura dei cibi;
- A partire dal secondo digestore installato, produrre biogas utilizzabile in un motore a combustione per la produzione di energia elettrica.

Il mio coinvolgimento in qualità di volontario ha previsto una permanenza in loco per un periodo di 8 settimane, dal 28 Ottobre 2012 al 24 Dicembre 2012, al fine di:

- Partecipare alle attività di campo, quali la costruzione del secondo digestore semplificato e la gestione del primo, in modo da entrare in contatto con la tecnologia e le esigenze operative della famiglia beneficiaria e degli stake holders;
- Redigere un piano di monitoraggio, preludio di una investigazione scientifica approfondita, seppur limitatamente al budget del progetto, atta al miglioramento delle caratteristiche costruttive e gestionali dell'impianto.

L'attività svolta all'estero ha contribuito ad incrementare le conoscenze tecniche e la consapevolezza della realtà culturale, economica e sociale in cui il progetto si inserisce, grazie al lavoro svolto in affiancamento al personale locale, sia tecnico che non specializzato, già operativo sul territorio, con l'obiettivo di instaurare un diagolo interdisciplinare e multi-culturale finalizzato ad un mutuo scambio ed arricchimento sia in termini personali che in relazione al progetto stesso.

In particolare sono stati definiti i seguenti obiettivi di carattere prioritario:

- Miglioramento del disegno dell'impianto, sia in termini di dimensionamento che di scelta dei materiali, considerando prioritario l'impiego di prodotti economicamente ed ambientalmente sostenibili reperibili sul territorio;
- Valutazione di soluzioni impiantistiche di basso costo alternative all'attuale schema di funzionamento, con l'obiettivo di ottimizzare i parametri di processo, con particolare attenzione alla temperatura, la quale deve essere incrementata e mantenuta entro un ristretto range di variabilità per favorire le cinetiche metaboliche delle popolazioni batteriche coinvolte.

Figura 1.6 – Azienda agricola "Granja Alfacancha" a Vilcabamba

2. *Digestione anaerobica di reflui agro-zootecnici*

2.1. Introduzione al processo

La digestione anaerobica (DA) è un processo biochimico che, in assenza di ossigeno, porta alla degradazione di sostanze organiche complesse con produzione di un gas (biogas) costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte da CO_2. Il Global Warming Potential (GWP) del metano è di 25: è uno dei gas serra più inquinanti ed è quindi necessario evitare rilasci di biogas in atmosfera. Il potere calorifico del biogas, funzione del tenore di metano, è mediamente compreso tra 20 e 24 MJ Nm^{-3}. La degradazione della sostanza organica inizialmente presente e, conseguentemente, la conversione a biogas, può variare dal 40% ad oltre il 90%, in ragione della tipologia di substrato, della sua biodegradabilità e delle condizioni di processo.
La digestione anaerobica è un processo biologico in cui avviene la degradazione della materia organica da parte di batteri anaerobi, in condizioni di assenza di ossigeno.
Essa coinvolge diversi gruppi microbici interagenti tra loro: i batteri idrolitici, i batteri acidificanti (acetogeni ed omoacetogeni) ed, infine, i batteri metanigeni, quelli cioè che producono metano e CO_2.
Il processo è svolto da un consorzio batterico e comprende una serie di reazioni biodegradative, la più lenta delle quali determina il passaggio limitante il processo (Speece, 1996). Nessun ceppo batterico è in grado di condurre autonomamente la completa degradazione anaerobica della sostanza organica; ciascuna popolazione, quindi, ha un ruolo ben definito nella demolizione della sostanza organica, producendo come cataboliti degli intermedi di reazione che fungono da substrato per la popolazione successiva nella catena trofica.
A termine della digestione, si conservano sostanzialmente inalterati i nutrienti (azoto e fosforo), che non vengono rimossi per via biochimica se non per le esigenze di sintesi batterica le quali, condizionate da rese specifiche molto basse, non comportano riduzioni significative. La ridotta sintesi di nuova biomassa è per altro una delle caratteristiche vantaggiose della digestione anaerobica.
A causa della lentezza delle reazioni anaerobiche in campo psicrofilo (temperature < 20°C), il processo viene normalmente operato in condizioni mesofile (30-35°C) o termofile (valori ottimali intorno a 55-60°C).
Il fabbisogno energetico principale della digestione è quindi rappresentato dall’energia termica necessaria per condurre il processo alle temperature sopra indicate, dipendente, a pari temperatura di origine dell’alimento e a pari temperatura ambientale, dalla portata di massa da trattare e dal tempo di ritenzione idraulico.
La digestione anaerobica presenta bilanci energetici positivi, dovuti al biogas prodotto; l’energia derivante dal metano è più che sufficiente a coprire i costi energetici dovuti al riscaldamento dei digestori.

La digestione anaerobica è un processo noto ed utilizzato da tempo allo scopo di trattare e stabilizzare reflui ad elevata concentrazione di sostanza organica biodegradabile.
Il trattamento anaerobico di rifiuti e residui solidi è pure da molto tempo impiegato nelle discariche controllate, mentre è solo a partire dagli anni ottanta che cominciano ad essere sviluppati e, via via, realizzati impianti di digestione anaerobica specificamente dedicati al trattamento dei rifiuti solidi urbani e della frazione organica di questi.
La digestione anaerobica può essere applicata anche a reflui zootecnici, agricoli e rifiuti provenienti dalle industrie di trasformazione di tali prodotti. Tra i residui possono essere inclusi i liquami, letame, i residui agricoli e delle eccedenze di coltivazioni, ecc. Questi rifiuti possono essere trattati separatamente o in co-digestione.
Il processo di digestione anaerobica è anche adatto per il trattamento delle acque reflue ad elevato carico organico, come quelle prodotte nelle industrie alimentari.

2.2. Le fasi del processo

La digestione anaerobica della materia organica è una tecnologia complessa che coinvolge differenti gruppi di batteri che vivono in associazione sintropica. Il processo consta di diverse reazioni simultanee, catalizzate da microrganismi, nelle quali i composti passano attraverso differenti stati di ossidazione fino ad essere convertiti in metano ed anidride carbonica. In Figura 2.1 è riportato uno schema generale semplificato del processo, che non tiene conto della presenza di altri ceppi batterici quali i solfato e i nitrato riduttori. I primi riducono i solfati eventualmente presenti a H_2S ossidando gli acidi organici a CO_2 o l'idrogeno ad acqua. I secondi riducono i nitrati ad N_2 o NH_4^+ (Tiedje, 1988).
Entrambi questi gruppi operano in competizione con i processi riportati in Figura 2.1 e comportano quindi una certa riduzione del potenziale di produzione di biogas. Tale riduzione è generalmente trascurabile, a meno che si tratti di substrati particolarmente ricchi di questi composti. L'idrogeno solforato in forma indissociata, per contro, esplica una azione inibente nei confronti dei metanigeni a concentrazioni molari dell'ordine di 0.002-0.003 (Speece, 1996).

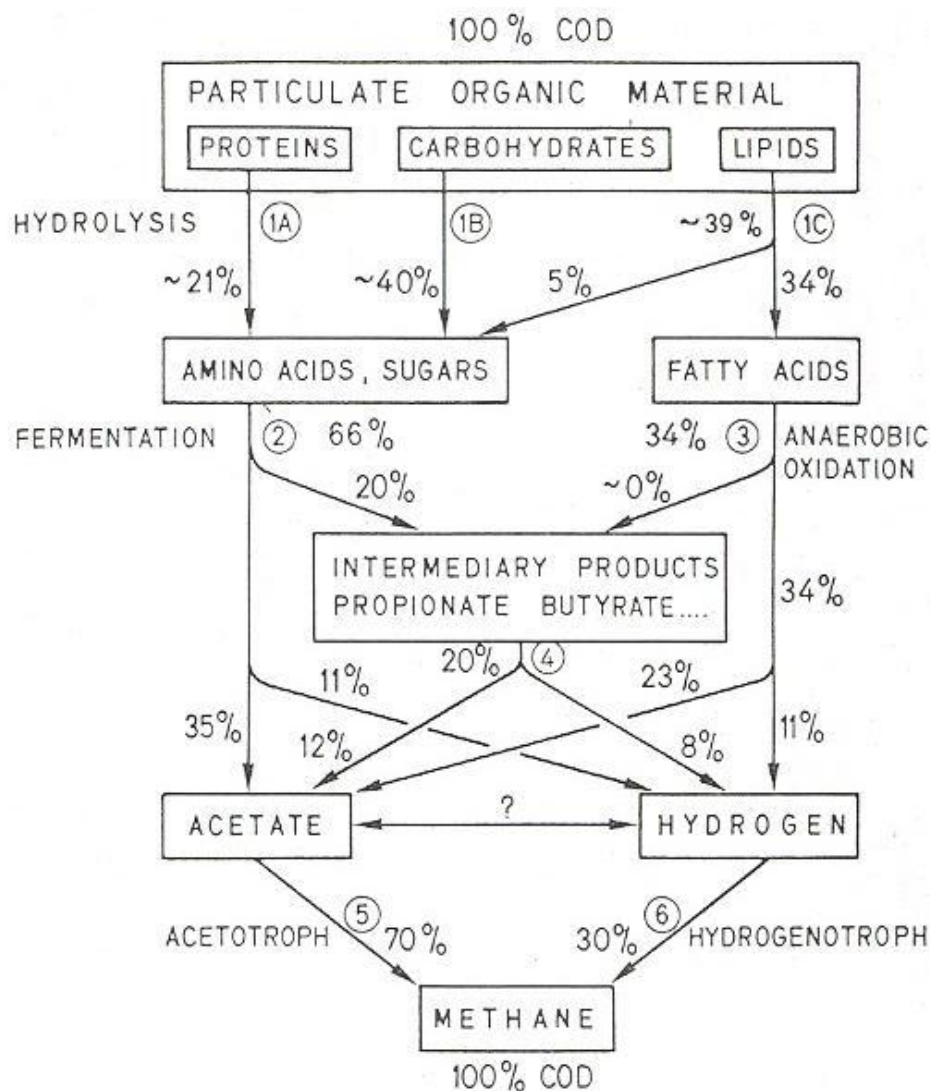



Figura 2.1 – Flusso di massa del COD particolato

La biodegradazione anaerobica è inoltre regolata da una serie di processi di tipo chimico-fisico, non mediati quindi dalla popolazione batterica. La conoscenza di questi equilibri e la loro quantificazione hanno una grande importanza, perché essi determinano condizioni che influiscono sulla biodegradazione (pH, concentrazione di CO_2 ed H_2 in fase liquida, maggiori o minori effetti di inibizione causati dalla presenza di ammoniaca libera e acidi volatili organici non dissociati, ecc.), il trasferimento dei gas disciolti alla fase gassosa e i fenomeni di precipitazione, che possono portare nel tempo ad incrostazioni, riduzione del volume utile dei reattori, ecc.. In Figura 2.2 sono schematizzati tali equilibri ed il legame con i processi di tipo biologico. Particolare importanza hanno l’equilibrio CO_2-bicarbonati, l’equilibrio NH_3-NH_4^+ e l’equilibrio tra le forme dissociate ed indissociate degli acidi organici.

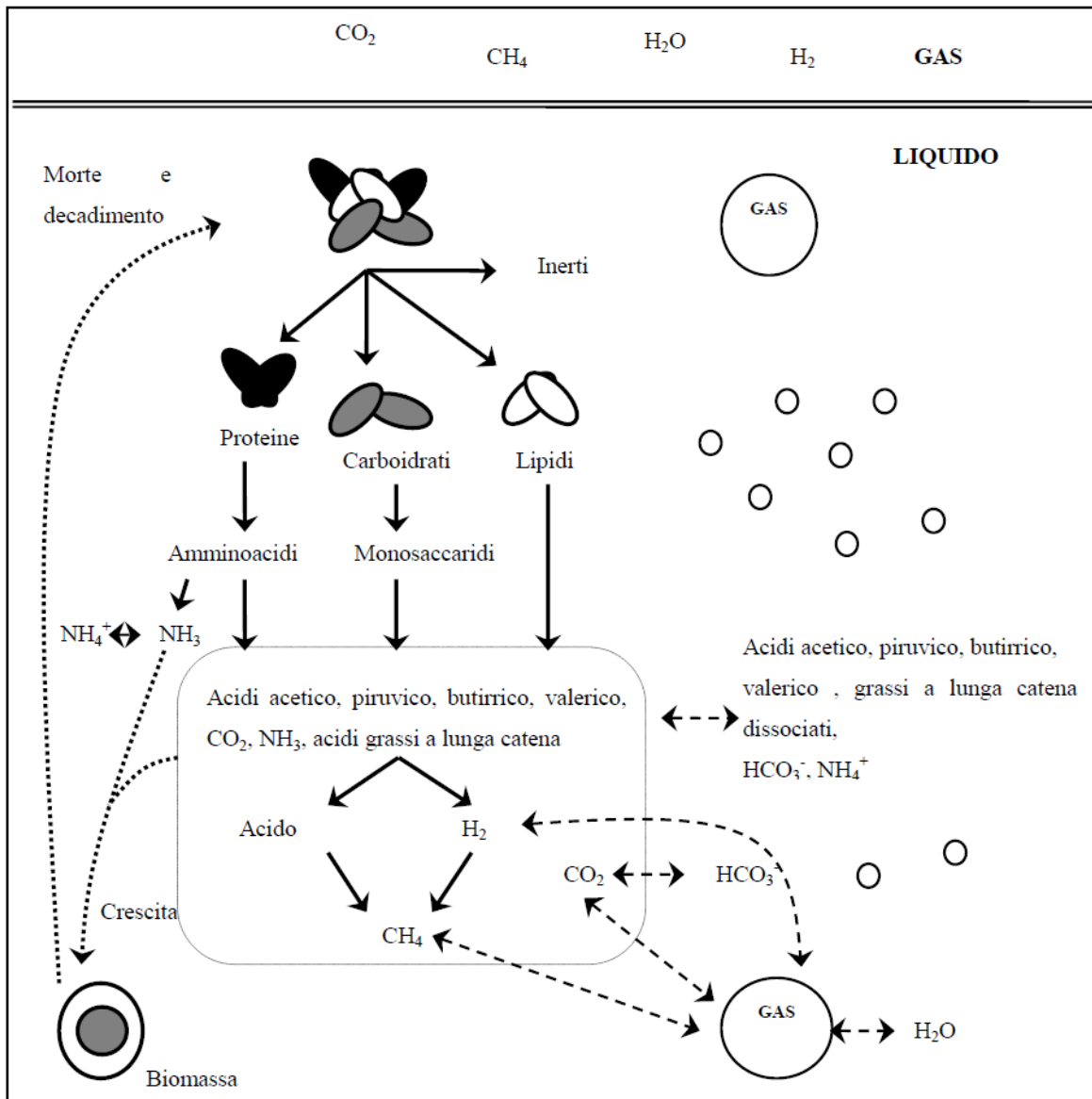



Figura 2.2 – Processi di conversione delle sostanze in digestione anaerobica. I processi di natura biochimica sono schematizzati dall'alto verso il basso della figura, mentre gli equilibri di natura chimico- fisica sono schematizzati orizzontalmente (IWA, 2002)

Vengono di seguito descritte in maniera sintetica le diverse fasi secondo il modello ADM1 (Anaerobic Digestion Model) predisposto dall'International Water Association (Batstone et al., 2002).

2.2.1. Idrolisi

Nella fase di idrolisi le molecole complesse sono convertite in molecole più semplici e facilmente metabolizzabili dai batteri. Mentre alcuni composti semplici solubili non richiedono idrolisi, la maggior parte dei residui organici è composta da materiale in forma particolata o colloidale e richiede quindi una prima fase di disgregazione a macro-composti: lipidi, proteine e carboidrati. Quindi sostanze come lipidi, carboidrati e proteine sono convertite rispettivamente in molecole di dimensioni minori come acidi grassi a catena lunga, monosaccaridi e amminoacidi.
L'idrolisi rappresenta solitamente lo stadio limitante dell'intero processo di digestione. L'azione principale è svolta da enzimi extra-cellulari (exoenzimi) prodotti da batteri idrolitici anaerobi facoltativi. La tipologia di enzimi predominante in ambiente anaerobico è quella legata alla molecola di substrato: i batteri aderiscono alla molecola di substrato, producono gli enzimi e successivamente utilizzano i substrati solubili prodotti (Vavilin et al., 1996). La fase di idrolisi è solitamente espressa con una cinetica del primo ordine (Eastman e Ferguson, 1981).

$$\boldsymbol{r = K \cdot X_S}$$

dove

- r è il tasso di idrolisi del substrato (g $m^{-3}d^{-1}$);
- X_S è la concentrazione di particolato (g m^{-3});
- K è la costante di idrolisi (d^{-1}).

Essa è rappresentativa di tutte le reazioni biochimiche e i fenomeni fisici di trasporto e diffusione coinvolti nel processo. L'idrolisi più lenta è quella dei lipidi; seguono in ordine decrescente quella della proteine e quella dei carboidrati.

2.2.2. Acidogenesi

L'acidogenesi consiste nella fermentazione dei monomeri organici. A partire da amminoacidi e zuccheri, risultato della degradazione delle proteine e dei carboidrati, vengono prodotti in rapporti diversi sia acidi grassi volatili (in particolare propionico, butirrico, valerico) sia acido acetico. Invece a partire dagli acidi grassi a lunga catena, originatisi dalla degradazione dei lipidi, viene prodotto soltanto acido acetico; questa reazione quindi non prende propriamente parte in questa fase, ma direttamente in quella successiva di acetogenesi.
La cinetica della crescita batterica netta dei batteri acidogeni è descritta da una classica espressione di Monod. Le cinetiche da utilizzare dovrebbero essere differenziate per i batteri che utilizzano carboidrati o amminoacidi; tuttavia, può essere in via semplificativa assunta una sola cinetica per entrambi (Gujer e Zehnder, 1983).

La cinetica di degradazione del substrato è descritta dalla seguente equazione (Malpei e Gardoni, 2007)

$$r = K_{max} \cdot \frac{S}{k_S + S} \cdot I_I \cdot X$$

mentre la crescita di nuova biomassa è descritta dal seguente modello di Monod (Malpei e Gardoni, 2007)

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{crescita} = \mu_{max} \cdot \frac{S}{k_S + S} \cdot I_I \cdot X - k_d \cdot X$$

In entrambe le relazioni:

- K_{max} (d^{-1}) rappresenta il tasso massimo di rimozione del substrato;
- S ($g\ m^{-3}$) rappresenta la concentrazione dei monosaccaridi e/o degli amminoacidi;
- k_S ($g\ m^{-3}$) è la costante di semisaturazione;
- I_I tiene conto di eventuali inibizioni;
- X è la concentrazione della biomassa acidogena ($g\ m^{-3}$);
- μ_{max} (d^{-1}) rappresenta il tasso massimo di crescita specifico della biomassa;
- k_d (d^{-1}) è il tasso di scomparsa della biomassa.

L'acidogenesi è un processo microbiologico in cui i composti organici funzionano sia da donatori che da accettori di elettroni.
Esistono inoltre diversi possibili percorsi di degradazione per uno stesso composto. Le principali reazioni di degradazione del glucosio $C_6H_{12}O_6$, utilizzato come esempio di monomero, sono:

- acido acetico: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
- acido propionico: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
- acido acetico e propionico: $3C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$
- acido butirrico: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$
- acido lattico: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH + 2CO_2 + 2H_2$
- etanolo: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$

Per quanto riguarda gli amminoacidi, la loro fermentazione dipende dalla struttura originaria delle proteine ed esistono due principali processi: il primo, denominato fermentazione di Stickland, prevede l'ossidazione di un amminoacido accoppiata alla riduzione di un altro e avviene più rapidamente; il secondo invece prevede l'ossidazione di un singolo amminoacido con ioni idrogeno o anidride carbonica come accettori esterni di elettroni.

2.2.3. Acetogenesi

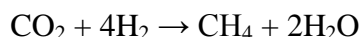
Durante questo processo, sia gli acidi grassi a lunga catena (provenienti dalla degradazione dei lipidi), sia gli acidi grassi volatili sono degradati ad acido acetico, biossido di carbonio e idrogeno ad opera dei batteri acetogeni idrogeno produttori obbligati. La reazione ha luogo solo in situazioni di basse concentrazioni di idrogeno, condizione che si verifica grazie alla presenza di batteri idrogeno consumatori. Infatti sia i batteri consumatori sia quelli produttori di idrogeno vivono in una tale simbiosi che una molecola di idrogeno prodotta è consumata entro una media di 0.5 secondi (Van Der Graaf, 1996). I batteri idrogeno produttori acetogeni sono rappresentati da due tipi di popolazioni: una produce acido acetico a partire da acidi grassi a lunga catena, l'altra a partire dagli acidi grassi volatili. In tale reazione, gli acidi grassi agiscono sia da donatori di elettroni producendo CO_2, sia da accettori trasformando H^+ in H_2. Seguono esempi di acetogenesi di acido propionico, acido butirrico e acido palmitico, cioè i principali acidi grassi ottenuti dalla fase di acidogenesi:

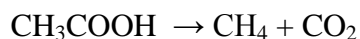
- acido propionico: $CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
- acido butirrico: $CH_3CH_2CH_2COOH \rightarrow 2H_2O$ ($2CH_3COOH + 2H_2$)
- acido palmitico: $CH_3(CH_2)14COOH \rightarrow 14H_2O$ ($8CH_3COOH + 14H_2$)

Una parte rilevante dei processi degradativi (circa il 30%, Speece et al. 2006) dell'intero processo anaerobico passa attraverso l'acido propionico, in particolare tutti quelli originati da polimeri aventi un numero dispari di atomi di carbonio e da alcuni zuccheri.

2.2.4. Metanogenesi

La produzione di metano è operata da ceppi di batteri detti metanigeni secondo due diversi percorsi. Il primo dall'idrogeno prodotto nella fase di acetogenesi che viene utilizzato dai *methanobrevibacter arboriphilus*, batteri metanigeni idrogeno consumatori i quali metabolizzano anidride carbonica riducendola a metano, ricavando gli elettroni necessari a tale riduzione dall'ossidazione del H_2 che passa ad H_2O:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

La frazione maggiore di produzione di metano, circa il 70%, deriva invece dalla trasformazione dell'acido acetico in metano e anidride carbonica, effettuata dai *methanosaracina* o *methanosaeta*, secondo la seguente reazione:

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

La velocità di crescita può essere espressa da una relazione di Monod.

Poiché i metanobatteri sono caratterizzati da un tasso di crescita più basso rispetto a quelli agenti nelle fasi precedenti, la metanogenesi risulta la trasformazione limitante di tutto il processo di stabilizzazione biologica; è pertanto necessario che le condizioni ambientali del reattore, quali pH, miscelazione e ossigeno disciolto siano favorevoli al loro sviluppo.

2.3. Controllo dei parametri di processo per l'ottimizzazione della digestione

In ambiente anaerobico i parametri influenzanti il processo sono diversi. Di seguito vengono descritti i principali.

2.3.1. Temperatura

La temperatura produce degli effetti importanti sia sulle caratteristiche fisico-chimiche dei substrati presenti nel digestore sia sulle popolazioni batteriche. Da essa dipendono la velocità e la completezza delle reazioni nonché la selezione dei ceppi batterici in grado di operare nell'intervallo di temperatura scelto. I batteri metanigeni sono più sensibili alla temperatura rispetto agli acetogeni (Speece et al., 1996). Si possono distinguere tre campi operativi:

- campo psicrofilo: 4-15 °C
- campo mesofilo: 20-40 °C (ottimo a 35°C)
- campo termofilo: 45–70 °C (ottimo a 55°C)

Si è osservato che all'interno di ogni intervallo di temperatura l'attività batterica aumenta con l'aumentare della temperatura seguendo la relazione di Vant'Hoff-Arrhenius, per poi decrescere superato il valore ottimale (Figura 2.3).

$$\boldsymbol{v_{max,T} = v_{max,20^\circ} \cdot \theta^{T-20^\circ}}$$

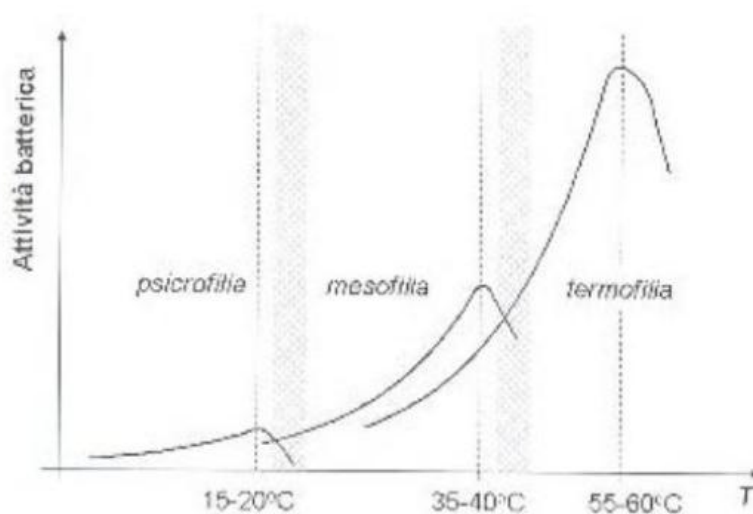



Figura 2.3 – Effetto della temperatura sull'attività batterica. In grigio gli intervalli in cui il processo non è ottimizzato (Van Lier et al., 1997)

E' opportuno quindi evitare oscillazioni di temperatura maggiori di ±3°C, una volta stabilito il range di temperatura in cui operare. L'aumento di temperatura permette, oltre ad una migliore cinetica del processo, anche una maggiore solubilizzazione dei composti organici, facilitando la fase di idrolisi, e una riduzione della carica patogena, soprattutto per quanto riguarda il campo termofilo. Dall'altra parte però l'impiego di alte temperature (digestione termofila) può produrre degli effetti collaterali, come l'aumento della frazione di ammoniaca libera, che inibisce l'attività dei microorganismi (Appels et al., 2008).

2.3.2. pH

Ogni gruppo di batteri richiede uno specifico intervallo di pH ottimale. L'effetto inibente del pH è dovuto alla combinazione di diversi fattori ed è certamente uno dei parametri di maggior rilievo nel controllo e nella ottimizzazione della digestione anaerobica. La dipendenza dal pH è stata rilevata per tutti i ceppi batterici coinvolti, anche se l'effetto più marcato e più importante si ha sui batteri metanigeni. I batteri acidogeni e acetogeni sono meno sensibili al pH e continuano la loro attività anche in condizioni di pH acido fino a un valore di 4.5. L'acidogenesi e l'acetogenesi sono favorite a pH acidi, dell'ordine di 5 – 5.5, mentre l'intervallo entro il quale dovrebbe essere compreso il pH per consentire una adeguata attività dei metanigeni è generalmente indicato tra 6.8 e 8.2 (Speece, 1996), con valori ottimali tra 7 e 7.5. A valori inferiori l'attività metanigena risulta via via ridotta ed al di sotto di pH 6 gravemente compromessa, con tempi di recupero dell'attività, al ristabilimento delle condizioni di pH, di alcune settimane. In questo caso mentre l'attività metanigena si ferma la produzione di acidi grassi volatili continua. La produzione di acidi grassi volatili può abbassare il pH durante la digestione anaerobica, questo abbassamento è contrastato dall'alcalinità in entrata e da quella prodotta dai batteri metanigeni. Il pH ottimale per il processo di produzione di biogas è 7 – 8.4; se questo aumenta o diminuisce si può avere un'inibizione dell'intero processo.

All'effetto proprio sul metabolismo dovuto al pH si somma anche l'effetto dovuto allo spostamento degli equilibri degli acidi organici verso la forma indissociata, a pH acidi. Queste forme possono attraversare passivamente la membrana cellulare, dissociarsi all'interno della cellula e compromettere così l'omeostasi. Tra questi in particolare la forma indissociata dell'H_2S è la causa di molti fenomeni di tossicità e inibizione (Speece, 1996). Per quanto detto, è quindi molto importante in un processo a piena scala controllare e prevenire fenomeni di instabilità e riduzione del pH, sia evitando sovraccarichi sia controllando frequentemente non solo il valore di pH, ma anche il rapporto tra alcalinità ed acidi volatili presenti, più indicativo di buoni condizioni del processo del solo pH. Per la digestione dei fanghi tale valore è raccomandabile non scenda sotto 3.5 $gCaCO_3/gCH_3COOH$ (Malpei, 1997).

2.3.3. Agitazione

Diverse esperienze hanno dimostrato che l'agitazione all'interno dei reattori è essenziale e favorisce il conseguimento dei seguenti obiettivi (Noone, 1990):

- mettere in contatto il substrato con i batteri;
- prevenire la sedimentazione nel reattore;
- garantire una distribuzione uniforme delle popolazioni batteriche;
- prevenire la formazione di zone morte che ridurrebbero il volume effettivo del reattore e la conseguente formazione di percorsi di favore;
- mantenere una temperatura uniforme evitando la stratificazione termica.

In particolare per la digestione anaerobica la miscelazione è importante per limitare l'accumulo degli intermedi di processo e rendere omogenee le condizioni ambientali in tutto il volume.

2.3.4. Ammoniaca

L'azoto ammoniacale è il prodotto della degradazione dei composti organici azotati, costituiti principalmente da proteine e urea (Appels et al., 2008). L'ammoniaca indissociata costituisce, tra queste la forma più tossica, poiché si comporta come una base debole ed è capace di attraversare, la parete cellulare del microrganismo e bloccarne l'attività metabolica (Appels et al., 2008). La dissociazione dell'ammoniaca in acqua è data da :

$$\boldsymbol{NH_4^+ \leftrightarrow NH_3 + H^+}$$

La concentrazione di ammoniaca libera è governata dalla seguente equazione di equilibrio tra ione ammonio ed ammoniaca indissociata, in funzione del pH e della temperatura (°C):

$$\frac{\boldsymbol{NH_3 - N}}{\boldsymbol{NH_4^+ - N}} = \frac{\boldsymbol{10^{pH}}}{\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{6344}/(\boldsymbol{273+T})}}$$

Come si può osservare la concentrazione di ammoniaca totale aumenta all'aumentare del pH e della temperatura. All'aumentare del pH e della temperatura la frazione non dissociata tende ad aumentare e quindi questo comporta un maggior rischio di inibizione per processi operanti in termofilia e a pH basici. La metanogenesi risulta inibita dalla presenza di elevate concentrazioni di ammoniaca indissociata.

2.3.5. Acidi grassi volatili a catena corta

Gli acidi grassi volatili (VFA) sono l'intermedio principale nella digestione anaerobica. Essi sono degradati da batteri acetogeni protoni-riduttori e dai batteri metanigeni idrogeno consumatori. In alcune situazioni di squilibrio dovuto a fattori come variazioni di temperatura, sovraccarico organico, presenza di composti tossici ecc. gli acidi grassi volatili possono accumularsi e aumentare di concentrazione (Mechichi e Sayadi, 2005). A concentrazioni comprese tra 6.7 e 9.0 moli m^{-3} essi possono essere tossici per i metanigeni (Batstone et al., 2000). I metanigeni quindi non sono più in grado di rimuovere abbastanza velocemente idrogeno e acidi organici. I VFA si accumulano, il pH decresce fino ad un punto in cui sia l'idrolisi che l'acetogenesi possono essere inibite (Appels et al., 2008).

Fase acidogena

- aumento degli acidi organici e degli acidi grassi volatili (AGV);
- abbassamento del pH (favorisce i batteri acidogeni ma inibisce i metanigeni);
- produzione di biogas ricco in CO_2 ma non in metano.

Fase metanigena

- diminuzione della concentrazione di AGV;
- l'innalzamento del valore di pH (7-8) favorisce la crescita dei batteri metanigeni;
- produzione di biogas ricco in metano.

2.3.6. Acidi grassi a catena lunga

Gli acidi grassi a catena lunga sono i prodotti di degradazioni dei lipidi, essi vengono poi ulteriormente degradati ad acido acetico ed idrogeno dai batteri acetogeni. Effetti di inibizione si possono presentare a basse concentrazioni per i batteri Gram positivi e non per i batteri Gram negativi (Chen et al., 2008). La tossicità è dovuta all'assorbimento degli acidi organici nella parete cellulare, il quale interferisce con il trasporto e/o le funzioni di protezione della cellula.

2.3.7. Composti tossici

Oltre agli elementi già citati (pH, ammoniaca, acidi volatili, idrogeno solforato), vi sono numerose altre sostanze che esercitano una azione tossica nei confronti dei batteri anaerobici e metanigeni in particolare.

Sostanze come i metalli pesanti (zinco, rame, piombo, cadmio) posso esercitare un effetto inibente sull'attività dei microrganismi se presenti in determinate concentrazioni. A basse concentrazioni invece, favoriscono il metabolismo dei batteri poiché fungono da micronutrienti. Non esistono limiti di concentrazioni che definiscano univocamente la soglia di tossicità, poiché l'inibizione è spesso frutto di un insieme di fattori: azione sinergica con altre sostanze, temperatura, pH, grado di adattamento della biomassa. Altre sostanze con effetti inibitori sono solventi, sostanze alogenate, chetoni, pesticidi,ecc. (Mata Alvareze Macè, 2004).

Determinante ai fini dell'effetto inibente in termini di attività metanigena è stato sperimentato essere il tempo di esposizione. L'attività metanigena può quindi essere rapidamente stabilizzata con una rapida rimozione del tossico dalla biomassa attuabile soprattutto in reattori plug-flow (Speece e Parkin, 1986).
Per alcuni tossici come l'ammoniaca, l'idrogeno solforato, il sodio, i fenoli o il cloroformio è stata verificata la possibilità di acclimatamento della biomassa, dosando quantitativi crescenti e intervallati delle sostanze. Con un sistematico acclimatamento è possibile aumentare la concentrazione tossica di alcune sostanze fino a 10 volte (Speece, 1996).

Nel caso della digestione di liquami zootecnici, un effetto inibente può essere provocato, oltre che dai metalli, dagli antibiotici. Esistono differenti tipologie di antibiotici, molte delle quali possono essere espulse ancora attive dagli organismi a cuivengono somministrati; tali sostanze si ritroveranno quindi nei liquami.
Lallai et al. (2002) hanno condotto ricerche e sperimentazioni valutando l'effetto di specifici antibiotici quali la Amoxicillina e il Tiofenicolo sulla produzione di biogas da un liquame di origine suinicola. I risultati mostrano come in effetti alcuni antibiotici siano in grado di inibire anche pesantemente la produzione di biogas.

2.4. I parametri di funzionamento

Vengono di seguito brevemente elencati i parametri fondamentali che determinano le condizioni e le prestazioni del processo di digestione anaerobica. Sono fondamentali per le valutazioni a scala di laboratorio e necessari per la gestione di impianti a scala pilota e a scala reale.

2.4.1. HRT (Hydraulic Retention Time)

Il tempo di residenza idraulica è dato dal rapporto tra il volume di liquido presente all’interno del reattore e la portata volumetrica di fanghi estratti dal sistema (in un reattore CSTR senza ricircolo). La variazione di questo parametro influenza le rese di rimozione in quanto determina la permanenza della biomassa nel reattore. HRT è il tempo medio trascorso dai liquami di ingresso all'interno del digestore prima che esca. In Paesi tropicali come l'India, il tempo di ritenzione idraulica varia da 30 a 50 giorni, mentre nei paesi a clima più freddo può andare fino a 100 giorni. Un tempo di ritenzione più breve può comportare il rischio di dilavamento della popolazione batterica attiva mentre un tempo di ritenzione prolungato richiede un notevole volume del digestore e, quindi, un maggior capitale economico. Quindi vi è la necessità di ridurre l’HRT per impianti di biogas domestici basati sul trattamento di matrici solide.

2.4.2. OLR (Organic Loading Rate)

Questo è un parametro fondamentale per la gestione dell’impianto, che influenza il processo e la produzione di biogas. E’ indicativo del carico organico che viene alimentato giornalmente nel reattore. Viene calcolato con la seguente formula, in funzione della concentrazione di solidi volatili alimentati $SV_{alimentati}$ e del volume del reattore $V_{reattore}$:

$$\boldsymbol{OLR = \frac{SV_{alimentati}}{V_{reattore} \cdot giorno}}$$

Il tasso di produzione di biogas è fortemente dipendente dalla velocità di caricamento. È stato dimostrato che la resa di produzione di metano aumenta al diminuire del tasso di carico (Vartak et al., 1997). In uno studio condotto in Pennsylvania su di un impianto di taglia 100 m^3 alimentato a letame, quando OLR è stato variato da 346 kgSV/giorno a 1030 kgSV/giorno, la resa di biogas è aumentata da 67 fino a 202 m^3/giorno. Esiste una velocità di avanzamento ottimale per una particolare tipologia di impianto, a cui corrisponde la massima produzione di biogas e, oltre la quale, un’ulteriore aumento della quantità di substrato alimentato non produrrà più biogas proporzionalmente.

Un digestore a scala di laboratorio operante a diversi OLR ha prodotto una resa massima di 0,36 m^3/kgSV ad un OLR di 2,91 kgSV/m^3/giorno (Sundrarajan et al., 1997).

2.4.3. *Dimensione delle particelle*

Anche se la dimensione delle particelle non è un parametro così importante come la temperatura o il pH dell’ingestato, ha una certa influenza sulla produzione di biogas. La dimensione del materiale alimentato non dovrebbe essere troppo grande altrimenti provocherebbe l'intasamento del digestore. Particelle più piccole invece fornirebbero grande superficie di adsorbimento come substrato, con un conseguente aumento dell'attività batterica e quindi una maggiore produzione di biogas. Sharma et al. (1988) hanno trovato che su cinque dimensioni di particelle (0.088, 0.40, 1.0, 6.0 e 30.0 millimetri), la quantità massima di biogas è stata prodotta da materie prime di 0.088 e 0.40 mm. I risultati suggeriscono che un pretrattamento fisico come la molatura potrebbe ridurre significativamente il volume richiesto al digestore, senza diminuire la produzione di biogas (Gollakota e Meher, 1988; Moorhead e Nordstedt, 1993).

2.4.4. *Rapporto C:N (carbonio:azoto)*

È necessario mantenere la corretta composizione della materia prima alimentata per il funzionamento efficiente dell'impianto in modo che il rapporto C:N nell’ingestato rimanga all'interno dell'intervallo desiderato. Sperimentalmente è stato determinato che i microrganismi utilizzano durante il processo di digestione anaerobica, il carbonio 25-30 volte più velocemente dell’azoto. Così per soddisfare questo requisito, i batteri hanno bisogno di un rapporto 20-30:1 di C e N con il valore più elevato riferito a carbonio facilmente degradabile (Bardiya e Gaur, 1997; Malik et al, 1987). Alcuni studi hanno suggerito che rapporto C:N varia con la temperatura. Secondo lo studio condotto da Idnani e Laura (1971), la produzione di biogas da 0.5 kg di letame bovino è stato quasi raddoppiato (da 17.2 L a 31.5 L) mediante l'aggiunta di 200 mL di urina. L'uso di materiali di scarto imbevuti nelle urine è particolarmente vantaggioso durante i mesi invernali, quando la produzione di biogas è comunque bassa.

2.5. Tecniche di miglioramento del processo di digestione anaerobica

La mancanza di stabilità di processo, i bassi tassi di carico, la lenta ripresa dopo fenomeni inibitori, e i requisiti specifici per la composizione dei rifiuti sono alcuni dei limiti che contribuiscono a fare della digestione anaerobica un processo lento (Van der Berg e Kennedy, 1983). Nelle tabelle seguenti vengono elencate le criticità e i punti di forza del processo di digestione anaerobica mostrando, ove possibile, le differenze con il metabolismo di tipo aerobico.

Tabella 2.2 – Confronto tra metabolismo aerobico ed anaerobico

Confronto tra metabolismo aerobico ed anaerobico	
Aerobico	***Anaerobico***
Cinetiche relativamente veloci, caratterizzate da un'utilizzo spinto del substrato. Elevati valori di μ_{max} (coefficiente di crescita) e bassi valori di k_s (costante di semisaturazione). In un reattore completamente miscelato la velocità effettiva di rimozione non si riduce di molto.	Presentano valori di k_s elevati e quindi le velocità di rimozione e di crescita si riducono quando siano richieste basse concentrazioni effluenti. Non è quindi consentito ottenere concentrazioni di substrato molto ridotte allo scarico. Per ovviare si può procedere ad una configurazione a stadi.
Si basa sull'azione di numerosi ceppi batterici con vie metaboliche spesso indipendenti: consentono di degradare un'ampia gamma di composti organici.	Si basa sull'azione di ceppi batterici specifici in sequenza capaci di utilizzare una ristretta gamma di composti organici. Processi più sensibili alle condizioni operative. Elevata dipendenza da condizioni di temperatura e pH (conseguenti alla fase acidogena): aggiunta di agenti basificanti.
Il coefficiente di resa cellulare Y è molto più elevato, di circa un ordine di grandezza, per i processi aerobici rispetto a quelli anaerobici. A parità di substrato rimosso, la produzione di biomassa è quindi assai maggiore nel processo aerobico. Ne consegue una più rapida fase di avviamento dei processi aerobici. In seguito la maggior produzione di biomassa si traduce nella necessità di maggiori estrazioni di fango di supero, con maggiori alimentazioni della linea fanghi.	

Tabella 2.3 – Elementi per la scelta tra depurazione aerobia e anaerobica di reflui biodegradabili

Elementi per la scelta tra depurazione aerobia e anaerobica di reflui biodegradabili	
Voce	***Implicazioni***
Cinetica della reazione	In presenza di basse concentrazioni di substrato, la cinetica aerobica è assai più veloce di quella anaerobica con conseguenti minori tempi di permanenza idraulica nei reattori
Influenza della temperatura	La cinetica anaerobica è più sensibile alla temperatura. Quando sussiste la possibilità di riscaldare i reattori, sono possibili notevoli aumenti nella velocità delle reazioni.
Rendimento depurativo	La lentezza delle cinetiche anaerobiche non consente di prolungare i processi fino ad avvicinare il compimento delle reazioni. La rimozione dei substrati è quindi incompleta, soprattutto se non si interviene con un aumento di temperatura.
Sintesi batterica	La sintesi batterica aerobica è più intensa di quella anaerobica, con produzione di fango di supero superiore di quasi un ordine di grandezza e con conseguenti implicazioni sugli oneri di smaltimento.
Fabbisogno di nutrienti	Anche in conseguenza della ridotta sintesi batterica, il fabbisogno di nutrienti per i processi anaerobici è più limitato. Ne derivano conseguenze sui livelli di rimozione di N e P conseguibili per sintesi quando tali elementi siano in eccesso e sui quantitativi di nutrienti da introdurre dall'esterno quando siano in difetto.
Flessibilità del processo	L'avviamento dei processi aerobici è più rapido. Per contro i processi anaerobici sopportano più facilmente discontinuità di alimentazione, con arresti anche assai prolungati (impianti stagionali).
Volume dei reattori	I minori tempi di permanenza idraulica dei processi aerobici implicano minor volumetria dei reattori. L'aspetto assume importanza tanto maggiore, quanto più elevate sono le portate trattate.
Aspetti energetici	Le trasformazioni aerobiche richiedono disponibilità di ossigeno disciolto che quasi sempre deve essere fornito per aerazione artificiale, con conseguenti consumi energetici. Nei reattori anaerobici i consumi energetici sono limitati alle esigenze della miscelazione. Le trasformazioni anaerobiche producono inoltre un catabolita gassoso ricco di metano (biogas), con un bilancio energetico complessivo largamente positivo.
Complessità e gestione impiantistica	Il razionale impiego dei processi anaerobici, con recupero del biogas per riscaldamento dei fanghi e per la produzione di energia, implica una maggiore complessità impiantistica e una maggior attenzione per la sicurezza (rischio di formazione di miscele esplosive).

In particolare, la riduzione della produzione di biogas durante la stagione invernale pone un serio problema nell'applicazione pratica di questa tecnologia. Kalia e Singh (1996) hanno scoperto che la produzione di biogas passa da circa 1700 L/d in maggio-luglio a circa 99 L/d in gennaio-febbraio. Tutto questo ha portato ad una limitata diffusione della tecnologia nelle zone rurali. Vi è dunque la necessità di migliorare l'efficienza complessiva del processo di digestione anaerobica negli impianti di biogas. Ciò potrebbe essere fatto in diversi modi:

1. impiegando diversi additivi chimici e biologici;
2. soddisfando le esigenze nutrizionali delle popolazioni batteriche interessate (Lettinga et al, 1980; Wilkie e Colleran, 1986) o manipolando le proporzioni di alimentazione dell'impianto (Sanders e Bloodgood, 1965; Nyns, 1986);
3. inoculando biomassa e ricircolando parte del liquame digerito (carico di biomassa batterica naturalmente trasportata al di fuori del reattore);
4. apportando modifiche a livello di progettazione degli impianti esistenti;
5. pretrattamenti ed ottimizzazione dei parametri.

Recentemente, sono stati compiuti sforzi per ridurre l'HRT o aumentare la produzione di biogas a parità di HRT, incorporando supporti che aiutano a trattenere la biomassa nei reattori.

2.5.1. Uso di additivi

Sono stati fatti alcuni tentativi in passato per aumentare la produzione di gas stimolando l'attività microbica utilizzando vari additivi chimici e biologici in diverse condizioni di funzionamento. Additivi biologici includono diverse piante, erbe infestanti (Gunaseelan, 1987), sfalci, colture microbiche, che sono naturalmente disponibili nei dintorni dell'impianto. Come tali, questi residui sono generalmente di minore importanza in termini di un loro uso nell'habitat, tuttavia se utilizzati come additivi nella produzione di biogas potrebbero migliorare le prestazioni dell'impianto in modo significativo. L'idoneità di un additivo dovrebbe essere fortemente dipendente dal tipo di substrato.

È stato dimostrato che le foglie polverizzate di alcune piante e leguminose (come *Gulmohar*, *Leucacena leucocephala*, *Acacia auriculiformis*, *Dalbergia sisoo* ed *Eucalyptus tereticonius*) sono in grado di stimolare la produzione di biogas tra il 18% e il 40% (SPOBD, Cina, 1979; Chowdhry et al, 1994). L'aumento della produzione di biogas sembra dovuto all'adsorbimento del substrato sulla superficie degli additivi; questo può portare alla concentrazione del substrato ed alla realizzazione di un ambiente più favorevole per la crescita batterica (Chandra e Gupta, 1997). Gli additivi aiutano anche a mantenere le condizioni favorevoli per la produzione di biogas nel reattore, come il pH, l'inibizione/promozione delle fasi di acetogenesi e metanogenesi per un miglior rendimento.

Residui colturali come stocchi di mais, paglia di riso, steli di cotone, paglia di grano e di giacinto d'acqua aggiunti allo sterco di bestiame parzialmente digerito aumentano la produzione di biogas nel range di 10 - 80% (El Shinnawi et al, 1989; Somayaji e Khanna, 1994).

2.5.2. Ceppi microbici

Alcuni ceppi di batteri e funghi sono in grado di migliorare la produzione di biogas, stimolando l'attività di particolari enzimi. Ceppi di batteri cellulosolitici, come attinomiceti e consorzi misti, contribuiscono ad un incremento nel range di 8.4 – 44% a partire da sterco di bestiame (Tirumale e Nand, 1994. Attar et al, 1998). Tutti i ceppi mostrano una gamma di attività di tutti gli enzimi coinvolti nella idrolisi della cellulosa. Geeta et al. (1994) hanno trovato che la bagassa della canna da zucchero pretrattata con Phanerochaete chrysosporium per 3 settimane in condizioni di temperatura ambiente produce più biogas che le deiezioni bovine.

2.5.3. Inoculo di biomassa nel digestore e ricircolo del digestato

È spesso necessario introdurre un inoculo di biomassa batterica all'interno del digestore per avviare il processo di fermentazione anaerobica. Generalmente l'inoculo è costituito da reflui pre-digeriti, oppure dai contenuti stomacali del bestiame: in particolare il contenuto del rumine dei bovini è estremamente ricco di popolazioni batteriche metanigene. L'inoculo tende a migliorare sia la resa di produzione di biogas, che la composizione in termini di metano; inoltre consente una riduzione del tempo di ritenzione idraulica. Il ricircolo del liquame digerito con sterco fresco potrebbe aiutare a superare il problema di impianti sotto-alimentati così come a mantenere la produzione di biogas più elevata nella stagione invernale. In compenso si presentano altri problemi come la precipitazione di substrato, aumento dell'acidità/alcalinità e la tossicità da ammoniaca. Brummeler et al. (1992) hanno suggerito che il ricircolo della frazione liquida del digestato induce una cinetica più rapida che non in condizioni anaerobiche controllate, come quelle di un impianto pilota alla temperatura di 35°C; inoltre hanno dimostrato che il fattore di scala non ha influenza sulle cinetiche. Il ricircolo era nell'ordine di 0.3 $m^3/(m^3 * giorno)$.

2.5.4. Tecniche di installazione per ottenere condizioni di temperatura ottimali

La maggior parte dei rimedi citati in letteratura per migliorare la produzione di biogas sono volti ad aumentare la temperatura del digestore al campo mesofilo (temperatura ottimale). Alcune precauzioni prese durante l'installazione di impianti di biogas e il loro rivestimento con materiali isolanti aiuta anche a mantenere la temperatura nel digestore all'interno dell'intervallo desiderato (Molnar e Bartha, 1989). Al fine di aumentare il rendimento di biogas, si preferisce costruire impianti opportunamente orientati al Sole e in modo tale da proteggerli dai venti freddi. Gli impianti di biogas devono essere coperti con residui colturali disponibili a livello locale per ridurre al minimo le perdite di calore. Una semplice tecnica di rivestimento del terreno intorno al digestore con carbone migliora la produzione del 7-15% (Anand e Singh, 1993). L'installazione di una struttura tipo-serra in PVC consente un riscaldamento solare del substrato da 18°C a circa 37°C. È stato possibile ottenere un notevole aumento della produzione di biogas in una tipica giornata invernale coprendo la sommità del reattore con un foglio di polietilene trasparente durante le ore di Sole e usando un materiale isolante mobile durante le ore di scarsa radiazione (Bansal,

1988; Tiwari et al, 1988). Desai (1988) ha scoperto che, se la temperatura dell'ingestato potesse essere mantenuta a 40°C, sarebbe possibile ridurre l'HRT di oltre il 40%. È stato dimostrato come gli stagni solari siano un utile sistema per prevenire perdite di calore durante la notte e nel mantenimento della temperatura di processo del digestore al livello desiderato. Uno stagno solare è una piscina di acqua salata che funge da collettore solare a larga scala, con immagazzinamento di calore integrato per la fornitura di energia termica. Uno stagno solare può essere utilizzato per varie applicazioni: come processo di riscaldamento, dissalatore, refrigerazione, essiccamento e di generazione di energia solare. Impianti che sfruttano l'energia solare raggiungono rendimenti di produzione di biogas superiori, in particolare durante i mesi invernali (Tiwari e Chandra, 1986).

2.5.5. Pretrattamenti ed ottimizzazione dei parametri

Nella digestione anaerobica, l'idrolisi biologica è identificata come la tappa limitante (Ghyoot e Verstrate, 1997). La maggior parte dei materiali organici solubili che possono essere convertiti in biogas sono prodotti durante il processo di idrolisi. Di conseguenza, la produzione di biogas dipende in gran parte dalla biodegradabilità e dal tasso di idrolisi. La produzione di biogas può quindi essere migliorata da diversi pretrattamenti per agevolare ulteriormente l'idrolisi. In questo passaggio ha luogo, sia la solubilizzazione del particolato che la decomposizione biologica dei polimeri organici a monomeri o dimeri. Cioè, le pareti cellulari sono rotte e sostanze polimeriche extra-cellulari sono degradate con conseguente rilascio di materiale organico prontamente disponibile per i microrganismi acidogeni. Questo migliora la velocità complessiva del processo di digestione e il grado di degradazione dei reflui, riducendo così il tempo di ritenzione idraulica e aumentando i tassi di produzione di metano (Muller, 2000). I pretrattamenti attualmente applicabili sono classificati in base a diverse categorie:

- Fisici (frantumazione, trattamenti termici, ultrasuoni, ecc.)
- Chimici (mediante l'impiego di alcali, acidi o ozono, ecc.)
- Biologici (mediante l'impiego di microrganismi specifici)
- Enzimatici (mediante l'impiego di enzimi specifici)

I pretrattamenti trovano un'utile ed efficace applicazione nella risoluzione dei problemi relativi alla produzione e allo smaltimento dei fanghi biologici di depurazione. Attualmente sia la legislazione relativa all'impiego agricolo sia le vie alternative di smaltimento (discarica, incenerimento) hanno subito delle limitazioni. Pertanto, in questo contesto, nasce l'esigenza di applicare i pretrattamenti, ad esempio la termolisi, a monte della digestione anaerobica con lo scopo di aumentare la degradabilità della sostanza organica e la produzione di biogas, ottenendo una riduzione dei quantitativi di digestato da smaltire. I pretrattamenti possono essere applicati anche per incrementare la biodegradabilità di matrici difficilmente degradabili, favorendone la digestione. I materiali lignocellulosici, ad esempio, rappresentano una componente abbondante degli scarti dei settori agro-alimentare ed agricolo, nonché dei rifiuti solidi urbani (frazione organica dei rifiuti e sfalci di potatura del verde urbano). La biodegradabilità e, di conseguenza, la potenziale produzione di biogas dei materiali lignocellulosici dipende principalmente dal loro contenuto di cellulosa, emicellulosa e lignina. Generalmente, la cellulosa e l'emicellulosa vengono degradate

facilmente dai microrganismi. Tuttavia, nei materiali lignocellulosici, esse sono associate alla lignina, che funge da barriera prevenendone la biodegradazione. Il pretrattamento, tramite l'impiego di microrganismi specifici, agisce rimuovendo il contenuto di lignina e di emicellulosa, riducendo la struttura cristallina della cellulosa e incrementando la porosità dei materiali e la superficie disponibile all'attacco dei microrganismi.

Dar e Tandon (1987) hanno osservato un miglioramento del 31 – 42% in degradabilità e un quasi raddoppio della produzione di biogas quando residui vegetali trattati con alcali (1% NaOH per 7 giorni) sono stati utilizzati in integrazione a sterco di bestiame. Un pretrattamento di digestione di reflui zootecnici freschi in un reattore di tipo batch per un periodo di 1 o 2 giorni alla temperatura di 30 – 35°C comporta una produzione di acetato; alimentando questo materiale all'interno di un digestore anaerobico continuo la produzione aumenta del 17 – 19% e la frazione di metano passa dal 68 – 75% al 75 – 86% (Singh et al., 1983). Patel et al. (1993) hanno osservato che il pretrattamento termochimico del giacinto d'acqua migliora la biometanazione ed i migliori risultati sono stati ottenuti quando il giacinto d'acqua è stato trattato a pH 11.0 e a 121°C. Il pretrattamento dei fanghi attivi per 30 minuti con ultrasuoni determina un aumento del 64% nella produzione di metano (Wang et al., 1999). L'insilamento di buccia di mango per 6 mesi, come pretrattamento, ha favorito la conversione dei carboidrati in acidi grassi volatili, producendo il 58% di biogas in più (Madhukara et al., 1993).

In generale, il pretrattamento termico di reflui può aumentare notevolmente la produzione di metano prodotto per via mesofila e in misura minore (in termini di incremento percentuale) per digestione anaerobica termofila, in quanto la digestione termofila è già più efficiente nella riduzione dei solidi sospesi volatili e produzione di metano rispetto alla via mesofila. Climent et al. (2007) hanno studiato il pretrattamento termico a bassa temperatura tra i 70ºC ed i 134ºC prima della digestione termofila, il quale ha comportato un aumento del 50% nella produzione di biogas. Ferrer et al. (2008) hanno studiato l'effetto di un pretrattamento a bassa temperatura (70°C) sulla efficienza della digestione anaerobica termofila dei fanghi che ha mostrato un effetto di iniziale solubilizzazione (aumentando solidi disciolti volatili di quasi 10 volte dopo 9 ore), seguito da una progressiva generazione di acidi grassi volatili. La produzione di biogas è aumentata fino al 30% rispetto a quella dei fanghi non trattati. Evidentemente, il pretrattamento termico richiede l'immissione di una quantità considerevole di calore, in quanto la materia prima fanghi deve essere preriscaldato alla temperatura di esercizio (700 kJ/m^3) a scapito di utilizzare parte del biogas prodotto. Inoltre la produzione di biogas non è proporzionale alla temperatura del pretrattamento. La maggior parte degli studi ha dimostrato che temperature troppo elevate (superiori a 170-190°C) portano ad una diminuzione della biodegradabilità dei reflui a dispetto di ottenere efficienze elevate di solubilizzazione. Infatti, in alcuni casi, vi è la formazione di composti tossici refrattari durante il pretrattamento (Delgenes et al., 2002).

Digestione anaerobica in due stadi

Il processo di digestione anaerobica in due fasi consente la selezione e l'arricchimento di batteri diversi controllando in modo indipendente le condizioni operative in ciascun sistema digerente. La denominazione originale di "digestione a due fasi" si basa sullo studio di Pohland e Ghosh (1971), che per primi hanno proposto di separare i due principali gruppi di microrganismi, batteri che formano acido e di batteri metanigeni, fisicamente in due reattori. Così, sono previste condizioni ottimali per le loro diverse cinetica di crescita. L'acido che forma, o batteri acidogeni sono favorite nella prima fase, producendo acidi grassi volatili (VFA) come acetato da fonti di carbonio complessi. I VFA vengono poi utilizzati dalla popolazione metanigena nella seconda fase del processo.

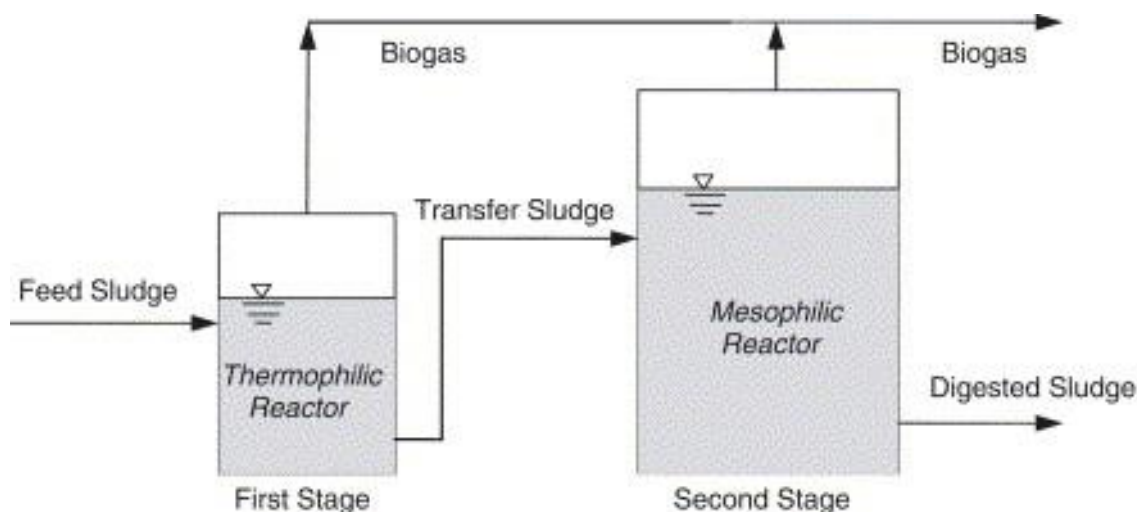



Figura 2.4 – Schema di processo generale del processo di digestione anaerobica a due fasi

Uno schema generale del processo anaerobico due fasi processo è mostrato nella Figura 2.4. Molti ricercatori hanno dimostrato i vantaggi dei due stadi di digestione anaerobica rispetto ai sistemi monostadio convenzionali, ad esempio Cohen et al., 1979 e Cohen et al., 1980. D'altra parte, alcuni svantaggi quali elevati costi di investimento e di instabilità operativa in determinate circostanze, sono noti come inconvenienti della configurazione di processo a due stadi. I benefici però sottolineano il significato di questa particolare tecnologia di digestione e quindi giustificano l'applicazione e lo sviluppo di un tale modello di processo.

2.6. Il biogas

Il biogas è una miscela di gas che si forma attraverso la fermentazione di sostanze organiche, in assenza di ossigeno. È composta per il 50-70% da metano e per il 30-50% da anidride carbonica. In più contiene minime concentrazioni di altre sostanze gassose, in particolare idrogeno e anidride solforosa. Il biogas è indicato dall'Unione Europea tra le fonti energetiche rinnovabili (eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione) che possono garantire autonomia energetica ed, attraverso la loro progressiva sostituzione alle fonti energetiche fossili, la riduzione graduale dell'attuale stato di inquinamento dell'aria e quindi dell'effetto serra. Il biogas può essere direttamente utilizzato per l'alimentazione di motori a scoppio o microturbine per produrre energia elettrica e recuperando il calore di combustione per usi termici. Si parla in tal caso di cogenerazione. Nel caso in cui, impiegando particolari macchine termiche, il calore sia utilizzato per produrre raffrescamento si parla di trigenerazione. L'energia prodotta dalla digestione anaerobica è a tutti gli effetti energia rinnovabile in quanto il gas non viene rilasciato direttamente nell'atmosfera e l'anidride carbonica deriva da fonte organica proveniente da un ciclo del carbonio breve. Segue che il biogas con la sua combustione non contribuisce all'aumento delle concentrazioni atmosferiche di CO_2 e grazie a ciò viene considerato una fonte energetica a basso impatto ambientale. Durante il processo della digestione anaerobica la produzione di biogas non avviene in modo costante: il livello massimo viene raggiunto durante la fase centrale del processo (metanogenesi). Nelle prime fasi della digestione la produzione di biogas è minore, perché i batteri non si sono ancora riprodotti abbastanza. Nelle fasi finali, resta solamente il materiali più difficilmente digeribile, con una conseguente diminuzione della quantità di biogas prodotto. Il corretto funzionamento dei processi di digestione anaerobica richiede il riscaldamento per favorire le giuste condizioni ambientali per il metabolismo microbico. L'energia necessaria per il riscaldamento può essere ottenuta dal biogas prodotto dall'impianto o da altri combustibili acquistati sul mercato utilizzati in generatori di calore, da impianti di cogenerazione (CHP), se presenti, o da eventuali altre fonti esterne di energia termica (cascami da altri processi/impianti). La necessità di utilizzare, per il riscaldamento dei digestori, combustibili diversi dal biogas autoprodotto ha un peso importante sui costi di gestione di un impianto di DA. Tale condizione può risultare critica soprattutto nel lungo periodo, in quanto si può ipotizzare un fisiologico aumento del prezzo di mercato dei combustibili fossili, tra cui il gas naturale. La possibilità di incrementare la produzione di biogas utilizzando le potenzialità residue degli impianti potrebbe rendere disponibili quantitativi energetici superiori rispetto alle necessità dell'autosostentamento tali da poterne valutare un proficuo impiego all'interno dell'impianto stesso, sia per la produzione di calore (pre-riscaldamento), sia per la produzione di elettricità (cogenerazione), con elevati rendimenti (intorno all'85%), mantenendo la disponibilità di cascami termici da reimpiegare in situ.

2.7. Biomasse avviabili a digestione anaerobica

Si intende per biomassa “la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l’acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”. Questa è la formulazione prevista dalla Direttiva Europea 2009/28/CE, ripresa da tutta la legislazione ad essa riferente.

La DA si adatta bene alle materie organiche putrescibili come i fanghi di depurazione delle acque reflue urbane, i reflui dell’industria agro-alimentare, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani, reflui zootecnici. Non è adatta per sfalci e potature, anche per la presenza di sostanze inibenti (lignina). Tali frazioni solide sono solitamente avviate al trattamento aerobico di compostaggio.

Le principali biomasse che possono essere utilizzate in questo tipo di processo sono:

- fanghi di supero prodotti dal trattamento delle acque reflue;
- frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU);
- liquame suino;
- liquame bovino;
- deiezioni avicole (pollina);
- residui colturali;
- colture non alimentari ad uso energetico;
- scarti organici e acque reflue dell’agroindustria;
- acque di vegetazione (OMW, Olive Mill Wastewater).

Tra le varie biomasse impiegate per la produzione di biogas non a caso gli effluenti zootecnici sono la matrice principale: essi sono disponibili in grande quantità costanti nel tempo. La quantità e la composizione chimico-fisica dell’effluente zootecnico sono strettamente correlate non solo alla specie animale allevata, ma anche ad altri aspetti, quali:

- lo stadio di crescita (ad esempio lattonzoli, suini all’ingrasso, ecc.);
- la tipologia stabulativa (ad esempio pavimentazione piena o fessurata, uso o meno di paglia);
- il regime alimentare e le relative prestazioni (accrescimento in peso, produzione di latte);
- le modalità di pulizia (uso di acqua di veicolazione) e allontanamento delle deiezioni dai ricoveri.

2.7.1. Reflui di allevamenti suinicoli

I reflui provenienti dagli allevamenti suinicoli sono costituiti dagli escrementi e dalle urine degli animali allevati diluiti nelle acque impiegate per le pulizie dei locali di allevamento. A questi si aggiungono residui di alimenti, peli, paglie, sostanze impiegate per la disinfezione e detergenti.

Le caratteristiche quantitative e qualitative di questi reflui variano in misura considerevole da allevamento ad allevamento in funzione del tipo di allevamento (suino leggero, suino pesante, riproduttori, ecc.), dei sistemi di pulizia impiegati (grigliati, lavaggi con ribaltine e con getti d'acqua in pressione, ecc.), dalle dimensione (numero di capi allevati) e dalla composizione della popolazione animale (diverse razze, diverse età, diverso tipo di destinazione del suino, ecc.), dall'età degli animali e dal tipo di alimentazione (a secco, in umido, diversi tipi di mangime, ecc.).

A causa di questo grande numero di variabili non è possibile dare una descrizione generale abbastanza precisa delle quantità del refluo scaricato da una porcilaia e della sua composizione.

Per quanto riguarda la concentrazione dei solidi totali negli escrementi uniti alle urine, essa varia dal 6-7% utilizzando un'alimentazione umida, al 16-18% con un'alimentazione a secco. In ogni caso essi vengono ulteriormente diluiti dalle acque impiegate per la pulizia che varia moltissimo a seconda dei sistemi adottati, ed in media si aggira attorno ai 10-20 litri al giorno per capo.

Una caratteristica comune a tutti i reflui suini, ma in genere anche quelli bovini e di altri animali, è l'elevato contenuto di azoto. Questo costituisce un problema in quanto la digestione anaerobica non è in grado di abbassare il contenuto di azoto che si ritrova quasi completamente nell'effluente sotto forma ammoniacale e con valori tali da precludere lo scarico diretto in base alle normative vigenti. Quindi quasi sempre si rende necessario un post-trattamento, in genere biologico, che risulta sfavorito dal basso rapporto C:N (carbonio utilizzato nella digestione anaerobica). Dall'altra parte un processo aerobico potrebbe risolvere il problema della rimozione dell'azoto (nitrificazione/denitrificazione) tuttavia l'elevato carico organico dei reflui suini presenta notevoli richieste energetiche e quindi costi rilevanti. Per superare questi inconvenienti spesso si ricorre parallelamente ad entrambi i sistemi di depurazione biologica: trattamento aerobico del surnatante e anaerobico della frazione sedimentata del refluo.

Infine si ricorda che i reflui suini contengono solidi grossolani che possono causare inconvenienti a dispositivi meccanici ed idraulici, oltre che essere di difficile biodegradabilità. Quindi si consiglia un pretrattamento di filtrazione grossolana utilizzando stacci vibranti o rotanti che tolgono dall'influente peli, paglie, ecc..

2.7.2. Reflui di allevamenti bovini

I reflui degli allevamenti bovini sono costituiti da feci e urine degli animali, a cui si aggiunge il materiale impiegato per la lettiera (quando il tipo di allevamento lo richiede; manca nell'allevamento su grigliato), le acque di lavaggio (sopratutto in presenza della sala di mungitura), i residui alimentari, ecc..

Anche per i reflui provenienti dagli allevamenti bovini valgono le stesse condizioni generali già indicate per i reflui suini, cioè l'estrema variabilità delle caratteristiche qualitative e quantitative in funzione di diversi fattori tra cui il tipo di allevamento, l'età degli animali, le dimensioni dell'allevamento, il tipo di stabulazione, il materiale eventualmente impiegato per la lettiera, il tipo di alimentazione, ecc..

La digestione anaerobica si presta al trattamento dei reflui provenienti da allevamenti su grigliato, dove il materiale da trattare è costituito in prevalenza da urine e feci, al contrario negli allevamenti dove si impiega la lettiera conviene la classica digestione in concimaia per la produzione di letame, ammendante tuttora ricercato in agricoltura. Quindi in seguito parlando di reflui bovini si farà riferimento al primo caso.

Una delle caratteristiche principali dei reflui bovini è l'elevata concentrazione di sostanze solide che ne aumentano la densità, creando spesso difficoltà di ordine tecnico per il pompaggio e la movimentazione nel reattore, e ne rendono difficile la sedimentazione. Per superare questi inconvenienti si ricorre spesso ad un tipo di reattore con poche esigenze operante sull'intero effluente senza alcun pretrattamento e con tempi di ritenzione dei solidi abbastanza lunghi da consentire una discreta riduzione del contenuto di solidi digeribili. In genere viene impiegato un reattore di tipo plug-flow costituito da una vasca dotata di opportuni setti per aumentare il rapporto lunghezza/larghezza del percorso, adeguatamente coperta per il recupero del biogas.

Tabella 2.5 – Caratteristiche chimiche principali dei liquami di origine suina e bovina: valori medi e variabilità (Fonte CRPA)

Caratteristiche indicative	*Liquami suini*		*Liquami bovini*	
	Valore medio	*Intervallo*	*Valore medio*	*Intervallo*
Sostanza secca – ST (%)	4.4	2.8 – 6.0	8.2	5.7 – 10.7
Sostanza organica – SV (% ST)	70	63 – 77	73	64 – 82
Azoto totale – TKN (% ST)	8.0	6.3 – 9.7	4.7	2.8 – 6.6

Tabella 2.6 – Coefficiente di produzione su base annua e per unità di peso vivo dell’animale (Fonte CRPA)

Coefficiente di produzione	***Liquami suini***		***Liquami bovini***	
	Quantità	***Soluzione stabulativa***	***Quantità***	***Soluzione stabulativa***
m^3deiezioni/(anno*t peso vivo)	37 – 44	Pavimentazione parzialmente o totalmente fessurata	20 – 33	Stabulazione libera su fessurato, cuccette senza uso di paglia
m^3deiezioni/(anno*t peso vivo)	55 – 73	Rimozione con acqua, pavimento pieno	9 – 16	Stabulazione libera con usa di paglia, su lettiera

Tabella 2.7 – Produzione specifica di biogas su base annua e per unità di peso vivo dell’animale e contenuto di metano (Fonte CRPA)

Produzione di biogas	***Liquami suini***		***Liquami bovini***	
	Quantità	***% metano***	***Quantità***	***% metano***
m^3/(anno*t peso vivo)	0.45 – 0.55	60 – 65	0.3 – 0.45	55 – 60

2.7.3. Scarti dell’agro-industria

L’attività agricola e l’attività agro-industriale producono quantità non trascurabili di scarti e sottoprodotti di natura organica di ottima qualità, in quanto costituiti da parti della stessa materia prima allonatanate durante la raccolta (prodotti agricoli) o lungo il percorso nelle linee di trasformazione industriale. I marco-comparti produttori di biomasse di scarto potenzialmente destinabili alla conversione energetica mediante digestione anaerobica sono riconducibili ai seguenti settori:

- Agricoltura (produzioni vegetali e animali): effluenti zootecnici, residui delle coltivazioni;
- Industria delle conserve animali-macellazione, prodotti insaccati: sottoprodotti di origine animale;
- Preparazione vegetali per il mercato del consumo fresco: cernita e sfridi di pulitura;
- Industria delle conserve vegetali, trasformazione ortaggi e frutta, trasformazione olive, uva e agrumi: buccette di pomodoro, scarti di frutta, sanse di olive, vinacce.

Tabella 2.8 – Caratteristiche chimiche dei principali scarti dell'agro-industria (Fonte CRPA)

	Solidi volatili (kg/t)	***Biogas (m^3/kg SV)***	***CH_4 (%)***	***TKN (%)***		***Solidi volatili (kg/t)***	***Biogas (m^3/kg SV)***	***CH_4 (%)***	***TKN (%)***
Prodotti e sottoprodotti vegetali					***Scarti agroindustriali animali***				
Insilato di sorgo succherino	282	0.60	53	1.75	Siero di latte	55	0.75	60	2.32
Insilato di erba	248	0.56	52	2.70	Contenuti ruminali bovini	176	0.75	53	2.60
Insilato di grano	289	0.60	53	1.71	Sangue bovino	101	0.65	65	11.41
Insilato di mais	310	0.60	53	1.42	Fanghi di macelli suini	160	0.35	60	3.03
Scarti agroindustriali vegetali					Fanghi di macelli bovini	122	0.35	60	4.76
Scarti di lavorazione mais dolce	154	0.48	55	2.24	Fango flottazione avicolo	85	0.35	60	14.70
Scarti di leguminose	169	0.60	60	4.89	***Varie***				
Buccette e semi di pomodori	291	0.35	55	3.12	FORSU	140	0.60	51	1.82
Scarti di lavorazione patata	230	0.60	53	1.53	Glicerina	900	0.78	58	-

Con il termine *codigestione* si intende un processo di degradazione di substrati organici diversi in contemporanea, con lo scopo di incrementare i ratei di produzione di biogas grazie ad un sinergismo positivo creatosi in digestione per l'apporto dei nutrienti mancanti dal co-substrato. La miscelazione di diversi prodotti può consentire la compensazione delle fluttuazioni di massa stagionali, di evitare sovraccarichi o al contrario carichi inferiori alla capacità stessa del digestore e di mantenere quindi più stabile e costante il processo. Vantaggi economici rilevanti derivano, inoltre, anche dalla condivisione degli impianti e dei costi di gestione nel caso di sinergia con altri servizi, oltre che dall'aumento di produzione di biogas in relazione alle sue potenziali utilizzazioni e valorizzazioni energetiche.

2.8. Tipologie di impianto

Gli impianti di digestione anaerobica esistenti in Europa presentano, in maggioranza, digestori di tipo continuo (CSTR), monostadio o multistadio, con flusso liquido (concentrazione di solidi totali di circa 10%). Le taglie dimensionali degli impianti e le opzioni tecnologiche sia di trattamento che di produzione energetica variano in funzione delle tipologie di biomassa disponibili e dei quantitativi avviati alla fermentazione. Inizialmente, gli impianti trattavano integralmente o FORSU o effluenti zootencnici, dividendosi, dunque, in due filoni separati che con il tempo, però, tendono a fondersi, per effetto dell'incremento degli impianti di codigestione di diverse biomasse (Schievano A., D'Imporzano G., Adani F., 2006). Di seguito vengono presentate le principali tipologie di reattori disponibili per il processo di digestione anaerobica.

2.8.1. Processi batch

Nei processi di tipo batch o SBR (Semicontinous BioReactor) il reattore viene riempito una sola volta, il substrato è degradato e il percolato che si produce durante la digestione viene ricircolato. Questo determina delle variazioni temporali nella composizione e nella produzione del biogas, che aumenta nella prima fase fino a raggiungere un massimo all'incirca in corrispondenza della metà del tempo di residenza, quando inizia a diminuire. Al termine del processo, il digestore viene svuotato nella vasca di accumulo e solo piccole quantità di digestato rimangono nel reattore per inoculare il carico successivo. I processi di tipo batch sono più utilizzati nel caso della digestione a secco, che non necessita di miscelazione durante il tempo di digestione. Il vantaggio dei processi batch consiste nei bassi costi di esercizio e degli impianti meccanici, a fronte di svantaggi relativi alla discontinuità della produzione di biogas e agli elevati consumi energetici.

2.8.2. Processi in continuo

In questi sistemi, il substrato è alimentato in modo costante al digestore e, di conseguenza, anche il biogas è prodotto in continuo. I digestori che appartengono a questa categoria possono essere distinti in reattori con flusso a pistone (plug-flow) o completamente miscelati (CSTR).

Reattori plug-flow (a pistone)

Questa tipologia di reattore viene applicata principalmente per digestori di effluenti zootecnici liquidi e di piccola taglia, grazie alla sua semplicità e al basso costo di investimento, in vasche longitudinali prive di miscelazione ed eventualmente compartimentalizzate in una prima sezione di accumulo e idrolisi del materiale sospeso e in una seconda sezione, in cui il liquame giunge per stramazzo, di metanogenesi. In Italia l'utilizzo di reattori plugflow per il trattamento di reflui zootecnici ricorre per circa il 23% dei trattamenti (Fabbri et al. 2010) Il reattore a pistone può essere utilizzato sia nel trattamento dei liquami zootecnici sia nella stabilizzazione dei fanghi derivanti dalla flottazione di reflui agro-zootecnici. I sistemi plug-flow che trattano substrati liquidi (inferiori al 10% di secco) possono essere soggetti a stratificazione, quando le componenti più pesanti (ad esempio sabbia e limo) sedimentano, mentre il biogas favorisce la flottazione delle componenti più leggere (ad esempio le fibre organiche), formando spesse croste e richiedendo interventi periodici di manutenzione del reattore. L'altro ambito di applicazione si ha nella digestione a secco di matrici solide, quali le coltivazioni energetiche, in analogia con quanto avviene per la FORSU. Teoricamente, infatti, la velocità del processo è superiore in un sistema a pistone, rispetto ad un reattore completamente miscelato, purché vi sia ricircolo per garantire l'inoculo della biomassa metanigena. Inoltre, sono sistemi che risentono meno della presenza di inerti ed elementi estranei.

Reattori completamente miscelati (CSTR)

I reattori completamente miscelati (Completely Stirred Tank Reactor) rappresentano la tipologia più comune di reattore di digestione anaerobica operanti a umido (tenori di secco fino al 15%). Questa tipologia di reattori è idonea per il trattamento dei liquami suini e bovini e/o alla codigestione degli effluenti suini e/o bovini con altri co-substrati, quali colture energetiche e/o scarti organici industriali. Sono costituiti da vasche cilindriche provviste di sistemi di miscelazione e possono operare sia in condizioni mesofile che termofile. Nei processi ad umido si opera con carichi organici volumetrici compresi tra 2 e 5 $kgSVm^{-3}d^{-1}$. I reattori possono avere diverse forme, da quelle con il profilo schiacciato (con diametro superiore all'altezza) a quelle a uovo (che ottimizzano la miscelazione e

minimizzano la possibilità di stratificazione), la copertura può essere fissa, mobile o flottante. La prima configurazione è quella tipica nell'ambito della digestione di substrati di provenienza agricola e di miscele di liquami ed altri substrati. L'agitazione meccanica nei reattori completamente miscelati è una tecnologia ben consolidata, che garantisce una buona efficienza di degradazione della sostanza organica. Per contro presenta elevati costi di installazione e costi energetici legati al sistema di miscelazione. In Italia, l'utilizzo di reattori CSTR per il trattamento di reflui zootecnici ricorre per circa il 57% dei trattamenti (Fabbri et al., 2010).

Reattori ad alto carico

I reattori ad alto carico consentono un aumento dell'efficienza grazie all'immobilizzazione all'interno del reattore di elevate concentrazioni di biomassa. Sono quindi in grado di operare a carichi volumetrici più elevati rispetto agli altri reattori a flusso continuo (8-20 $kgSVm^{-3}d^{-1}$). Tuttavia, si tratta di sistemi che sono poco efficienti nel convertire la frazione particolata del substrato in biogas e nei quali possono formarsi accumuli di materiale particolato non digerito. Non sono adatti alla digestione di effluenti agro-zootecnici, mentre possono essere impiegati nel caso di substrati contenenti composti organici solubili e con ridotto o nullo contenuto di solidi sospesi, quali alcuni reflui agro-industriali: i residui dell'industria casearia (siero di latte) o i reflui liquidi dall'industria conserviera (residui della lavorazione di succhi di frutta), o distillerie di prodotti alcoolici. Appartengono a questa tipologia i seguenti reattori:

- Reattori a biomassa adesa, nei quali la biomassa aderisce a supporti installati nel reattore sottoforma di un biofilm. Il substrato viene ricircolato sui supporti e viene in contatto con i batteri del biofilm. Tra i reattori a biomassa adesa compaiono i reattori a letto fisso, a letto espanso e i filtri anaerobici, nei quali i supporti sono costituiti da grani di plastica, sabbia o supporti di diverse configurazioni;
- Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), nei quali la biomassa può essere presente in forma fioccosa (per carichi idraulici inferiori a 0.2 $m\ h^{-1}$) o granulare per carichi idraulici più elevati (dell'ordine di 0.5 $m\ h^{-1}$). Tipicamente hanno forma circolare e sono dotati di un sedimentatore trifasico per una più efficiente separazione della fase liquida, solida e gassosa che consente di massimizzare il tempo di residenza dei solidi e di minimizzare il dilavamento della biomassa;
- Sistemi MBR (Membrane Bio-Reactor) anerobici, che utilizzano una membrana come barriera fisica per separare le fasi solida/liquida/gassosa e la ritenzione della biomassa; sono indicati per trattare elevati carichi inquinanti con portate limitate e molto concentrate e consentono di ottenere effluenti con ottime caratteristiche dal punto di vista del contenuto dei solidi sospesi.

2.8.3. Contenuto di solidi

Si definisce digestione a secco quando il tenore di solidi all'interno del reattore (in termini di SV) è superiore al 20% e a umido quando il tenore di SV è inferiore al 10%. Per quanto riguarda gli impianti di trattamento dei reflui agro-zootecnici, prevale l'applicazione di tecniche di digestione ad umido, mentre la digestione a secco è quella maggiormente impiegata per il trattamento dei rifiuti solidi urbani.

Digestione a secco

La digestione a secco è stata originariamente impiegata per il trattamento di materiale ad elevate concentrazioni di solidi (quali i RSU o la FORSU) ed è possibile anche nel caso della digestione di sole colture energetiche. Grazie al minor contenuto d'acqua nel reattore, è possibile operare a maggiori carichi volumetrici (fino a circa 10 kgSV m^{-3} d^{-1}, Balzonella et al., 2006) da cui conseguono minori volumetrie e quindi costi di realizzazione. Inoltre, grazie al fatto che nella digestione a secco non si realizza la separazione delle fasi, si evitano i conseguenti problemi di presenza di croste sulla superficie o di sostanze sedimentate sul fondo del reattore, che determinano una diminuzione del volume effettivo del reattore. Nei sistemi a secco sono maggiormente utilizzati i reattori di tipo plug-flow, per una serie di motivi quali la maggior facilità di movimentazione del materiale, le più elevate cinetiche, il minor rischio di cortocircuiti. Lo svantaggio dei processi a secco consiste nella necessità di sistemi più robusti e quindi più costosi per la movimentazione e digestione del substrato (Lissens et al., 2001), richiedendo particolari sistemi di pompaggio e miscelazione. Inoltre, la mancanza di acqua di diluizione minimizza la possibilità di diluire l'eventuale presenza di sostanze inibenti o carichi organici troppo elevati, che possono sbilanciare il processo verso la fase acidogena.

Digestione a umido

La digestione a umido si applica ai substrati aventi concentrazioni di secco inferiori a 10-12%, all'interno dei quali rientrano i reflui zootecnici e i fanghi. Il trattamento di rifiuti solidi (SS > 22-25%) richiede quindi la miscelazione e la diluizione con substrati liquidi o, in alcuni casi, acqua. Il digestato è un fluido pompabile per il quale è quasi sempre opportuna una successiva disidratazione. La tipologia impiantistica più comune per la digestione a umido è quella di reattori completamente miscelati (CSTR), nel quale è necessaria una buona miscelazione per assicurare il giusto tempo di contatto dei batteri con il substrato e per evitare cortocicuiti (che si verificano quando il materiale entrante non si miscela perfettamente con quello già presente nel reattore e ne fuoriesce con tempo di ritenzione inferiori a quelli di progetto). Il verificarsi di fenomenti di cortocircuito implica,

oltre a una minore degradazione del substrato, la presenza di microrganismi patogeni nel digestato. La sedimentazione sul fondo di sostanze indesiderate nel substrato alimentato al digestore può limitare il volume utile del reattore e causare danni al sistema di miscelazione e di pompaggio e richiede la previsione di salutari fermo-impianto per la rimozione degli strati pesanti e galleggianti. Inoltre, in generale la fase di pretrattamento del substrato è importante ed è generalmente più costosa di quella presente nei sistemi a secco. Questo vale in particolare per substrati quali la FORSU, mentre per i reflui zootecnici viene generalmente utilizzata una semplice vagliatura e per gli insilati può essere prevista un'eventuale riduzione della pezzatura. I sistemi ad umido operano generalmente con carichi organici contenuti, attorno ai 2-4 kgSV m^{-3} d^{-1}.

2.8.4. Numero di stadi

Si ricorda brevemente che il processo di digestione anaerobica avviene secondo le quattro fasi biochimiche principali, che avvengono sia simultaneamente sia in modo sequenziale, ciascuna caratterizzata da un proprio metabolismo e da ottimali condizioni in termini di temperatura a pH. La separazione delle fasi è tanto più opportuna quanto più i substrati alimentati sono particolati e complessi e richiedono una spinta ed efficace fase di idrolisi ed acidogenesi (coltivazioni energetiche, FORSU).

Trattamenti monostadio

Nello schema del trattamento monostadio tutte le quattro fasi della digestione anaerobica avvengono nello stesso reattore e il biogas viene raccolto nel digestore. Per impianti che trattano reflui agro-zootecnici, è importante disporre di una struttura al contempo semplice e solida, cosicché l'agricoltore possa mettere mano direttamente all'impianto, se necessario. Per questo motivo gli impianti monostadio sono diffusi in questo settore, anche se presentano una minore flessibilità e devono operare in condizioni il più possibile costanti. Questa configurazione è utilizzata nel caso di fermentazione di colture energetiche, che vengono alimentate direttamente nel digestore. Questi digestori operano con elevati tempi di residenza e carichi organici volumetrici relativamente bassi (nell'ordine di 1-4 kgSV m^{-3} d^{-1}), che consentono una maggiore stabilità del sistema.

Trattamenti bi-stadio e bi-fase

Nei trattamenti bi-fase la separazione delle fasi consente di ottimizzare le condizioni per ciascuna comunità microbica (Ghosh et al., 2000). In un processo a due fasi, generalmente, nel primo reattore si svolgono le fasi di idrolisi e acidogenesi, con un tempo di ritenzione idraulico basso (da 1-3 fino a 5 giorni) e un elevato carico organico volumetrico (superiore ai 10 kgSV m^{-3} d^{-1}). Nel secondo reattore la digestione termina con le fasi di acetogenesi e

metanogenesi. I fattori limitanti sono la velocità di idrolisi nel primo reattore e la velocità di crescita batterica nel secondo: una separazione delle due reazioni consente di incrementare la velocità di produzione di metano grazie ad una maggiore ritenzione della biomassa (Ghosh et al., 2000). La presenza del primo reattore consente inoltre di tamponare l'impatto sulla produzione di metano di eventuali improvvise variazioni nella velocità di alimentazione o nella concentrazione del substrato. Un ulteriore vantaggio del processo a due fasi consiste nel poter trattare anche substrati con bassi rapporti C/N, quali appunto i reflui agro-industriali e agro-zootecnici. Alcuni impianti sono definiti bi-stadio perché non operano con una chiara distinzione delle fasi e si configurano come impianti a due stadi (in entrambi si svolge la metanogenesi), piuttosto che impianti bi-fase, con minor efficacia complessiva, compensata da una maggior stabilità del processo e da minori necessità di controllo sull'andamento delle due fasi.

2.9. Il digestato

Il processo di digestione anaerobica consiste nella degradazione in assenza di ossigeno della sostanza organica contenuta nell'ingestato (materiale in ingresso costituito da effluenti di allevamento e/o biomassa vegetale). Il digestato, con il metano, la CO_2 ed altri gas minori è uno dei sottoprodotti di questo processo. Durante la digestione anaerobica peraltro i composti azotati presenti nell'ingestato non vengono eliminati, ma solo parzialmente trasformati da una forma in un'altra e si ritrovano quindi integralmente nel digestato.

Il digestato è il risultato della stabilizzazione, con buone capacità fertilizzanti, per l'elevato contenuto di azoto e fosforo e ammendanti soprattutto per la capacità di ritenzione di umidità e di contenuto organico (sostanze umiche per il terreno). Si tratta di una miscela con un contenuto in secco generalmente variabile tra il 15 e il 30%. Tuttavia in Italia, l'inquadramento normativo del digestato non è chiaro e attualmente viene generalmente avviato a smaltimento finale, sia in discarica, dove le norme stringenti attualmente vigenti ne rendono sempre più difficile il conferimento, oppure in agricoltura. Un'opzione interessante è quella di avviarlo a recupero di materia in impianti di compostaggio per formare un ammendante con buone proprietà nutritive previsto dal nostro ordinamento normativo sui fertilizzanti (ammendante compostato misto). Lo smaltimento del digestato, insieme ai costi energetici, rappresenta una voce di costo significativa, che varia sensibilmente a seconda delle modalità utilizzate di destinazione finale di tale prodotto: agricoltura, compostaggio, discarica.

2.9.1. Caratteristiche agronomiche del digestato

Il digestato è un prodotto ottenuto in seguito a profonde modificazioni biologiche e chimiche. Rispetto al materiale di origine il digestato è caratterizzato da:

- sostanza organica ad alta stabilità biologica;
- sostanza organica con alta concentrazione di molecole cosiddette recalcitranti (humus-precursori);
- azoto prontamente disponibile (alta concentrazione di azoto ammoniacale: 50-70 % sull'azoto totale);
- azoto organico contenuto in molecole complesse.

La dinamica di decomposizione della sostanza organica contenuta nel digestato è ancora oggetto di studio, tuttavia è ormai certo che si tratta di una matrice organica stabilizzata, igienizzata e pulita, di alto valore agronomico.

Prove sperimentali di campo hanno dimostrato che non ci sono differenze tra effluente di allevamento conservato in vasche di stoccaggio e effluente di allevamento digerito anaerobicamente per quanto riguarda la potenzialità a fornire azoto per la crescita delle colture. L'alta concentrazione di azoto ammoniacale presente nel digestato comporta tuttavia la necessità di distribuzione in pre-semina con immediato interramento per limitare le perdite di volatilizzazione dell'ammoniaca.

Il digestato tal quale in uscita dall'impianto di digestione anaerobica andrebbe preferibilmente sottoposto ad un processo di separazione solido/liquido. La frazione liquida può essere utilizzata per fertirrigazione, avendo tale frazione caratteristiche simili a quelle di un concime di sintesi a pronto effetto, mentre la frazione solida deve essere gestita come un effluente di allevamento con un immediato interramento a seguito della distribuzione.
La diversificata gestione dei due sottoprodotti (frazione liquida e solida) consente di ottenere migliori risultati agronomici, favorendo una migliore utilizzazione dell'azoto da parte delle colture, e di conseguenza, la sua minore potenziale dispersione nell'ambiente.

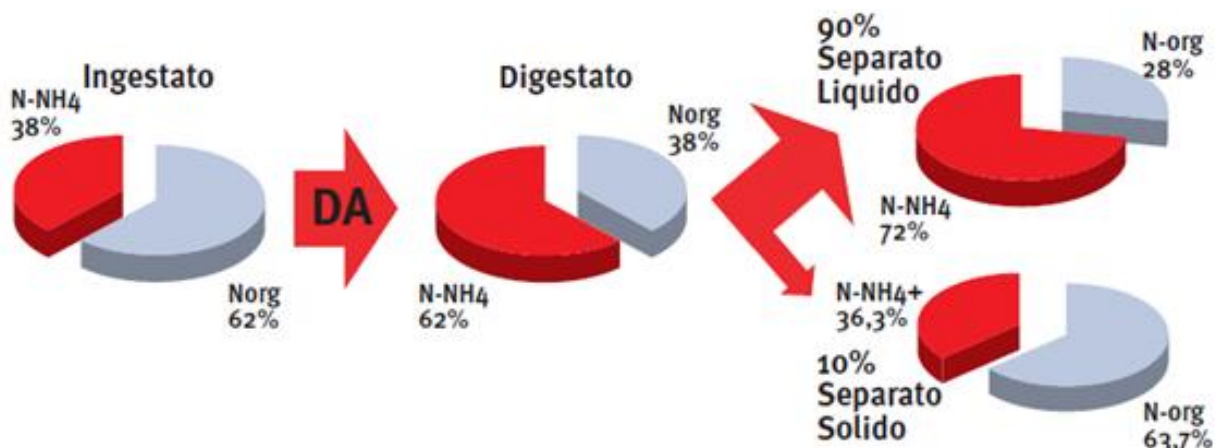



Figura 2.5 – Variazione della composizione relativa dei composti azotati durante il processo di digestione anaerobica

2.10. Abbattimento dei cattivi odori

L'emissione di molecole odorigene in attività produttive assume sempre più rilevanza anche in ambito agricolo. In particolare, la gestione degli effluenti di allevamento determina un forte rischio osmogeno (generazione di odore) soprattutto durante le fasi di stoccaggio e spandimento. La produzione di odore dipende prevalentemente dall'attività di batteri anaerobi che, fermentando e respirando anaerobicamente la sostanza organica contenuta nel refluo, producono molecole maleodoranti. L'odore di una sostanza viene normalmente percepito come se fosse dovuto ad un'unica componente, es. odore di letame, ma, in realtà, ogni emissione odorigena è caratterizzata da una molteplicità di composti, frutto dei processi degradativi, che in sinergia tra loro producono un determinato odore. In Tabella 2.11 sono riportati alcuni composti odorigeni rintracciabili nei reflui zootecnici. È evidente che man mano che si riduce, nel refluo, il contenuto di frazione organica facilmente degradabile, si riduce anche la possibilità da parte dei batteri di produrre molecole odorigene. Va da sé che, se la produzione di odori dipende dalla degradabilità della sostanza organica contenuta, e se la misura della stabilità biologica di un refluo/digestato risulta una misura semplice e poco costosa, essa può essere utilizzata quale parametro di caratterizzazione del digestato e del suo potenziale impatto odorigeno.

Tabella 2.9 – Composti odorigeni rintracciabili nei reflui zootecnici

COMPOSTO CHIMICO	SOGLIA OLFATTIVA* (MG/M^3)	CONCENTRAZIONE DI IRRITAZIONE (MG/M^3)	DESCRIZIONE DELL'ODORE
Ammoniaca	0,0266 – 39	72,0	Pungente, Irritante
Acido acetico	2,5000 – 250	25,0	Agro, acetico
Acido propionico	0,0840 – 60	-	Fetido
Acido butirrico	0,0010 – 9	-	Acre, sudore
Fenolo	0,1786 – 22,4	182,4	Medicinale, dolce

2.11. Effetto sul contenuto di patogeni

Il contenuto in microrganismi patogeni è un parametro estremamente importante nella valutazione della qualità del prodotto dal punto di vista igienico-sanitario per un utilizzo sicuro degli effluenti in agricoltura. Il processo di digestione anaerobica costituisce, a tutti gli effetti, un processo igienizzante in grado di abbattere il contenuto di microrganismi patogeni presenti nelle biomasse di scarto come evidenziato più volte dalla letteratura internazionale (Smith et al., 2005). L'entità dell'abbattimento e le cause dello stesso sono varie e differenti. La temperatura, in primis, gioca un ruolo fondamentale; processi termofili, determinano un'elevata igienizzazione del refluo. Processi mesofili, possono garantire un'elevata igienizzazione anche se, in questo caso, la gestione del processo diviene più importante in quanto la competizione tra microrganismi e la degradazione della sostanza organica divengono fattori determinanti. È evidente, quindi, che abbinare alla digestione anaerobica processi di trattamento del digestato permette un grande vantaggio in termini di "salute pubblica" e "accettabilità sociale" nell'utilizzo dei reflui zootecnici.

2.12. Impianti a biogas domestico nei Paesi in via di sviluppo

Esistono testimonianze storiche che suggeriscono che il biogas venne utilizzato per il riscaldamento dell'acqua del bagno in Assiria nel decimo secolo A.C. e che trattamenti di digestione anaerobica dei rifiuti solidi siano stati applicati nell'antica Cina (He, 2010). Nella provincia cinese di Guangdong l'uso commerciale di impianti di produzione di biogas è stato attribuito a Guorui Luo: nel 1921, costruì un digestore di 8 m^3 alimentato con i rifiuti domestici e, successivamente quel decennio, fondò una società per diffondere tale tecnologia (He, 2010). Il primo impianto di depurazione tedesco per fornire il biogas nella rete gas pubblica risale al 1920, mentre nello stesso Paese il primo grande impianto agricolo di biogas ha iniziato ad operare nel 1950.
La diffusione della tecnologia di produzione di biogas ha acquisito slancio negli anni settanta, quando l'impennata dei prezzi del petrolio aveva motivato la ricerca di fonti di energia alternativa. La crescita più veloce dell'utilizzo di biogas in molti paesi asiatici, latinoamericani e africani si è registrata negli anni settanta e nella prima metà degli anni ottanta (Ni tú Nyns, 1996). Durante tale periodo il governo cinese promosse "utilizzo di biogas in ogni famiglia rurale" e facilitò l'installazione di più di 7 milioni di digestori (He, 2010). Dalla seconda metà degli anni ottanta, mentre la tecnologia aveva trovato più applicazioni nel trattamento dei rifiuti industriali e urbani e la conservazione dell'energia, è rallentata la diffusione in aree rurali.

Nei Paesi in via di sviluppo, l'espansione dei sistemi di recupero del biogas è stata basata su piccoli reattori progettati per la digestione di escrementi di bovini, suini e pollame. Il biogas viene spesso utilizzato per cucinare, riscaldamento o produzione di elettricità. Impianti più grandi possono fornire biogas nelle reti di alimentazione.

Molti tipi diversi di reattori anaerobici per la produzione di biogas sono utilizzati in tutto il Mondo. In generale i modelli utilizzati nei Paesi in via di sviluppo per la digestione dei reflui agro-zootecnici sono classificati come low-rate, essendo più semplici rispetto a quelli nelle regioni più temperate e privi di riscaldamento e sistemi di agitazione. Questo è anche legato al clima: impianti senza isolamento non funzionano in modo soddisfacente quando la temperatura media è inferiore a 15°C (ISAT/GTZ, 1999).

Tre tipi principali di digestori sono utilizzati nei Paesi in via di sviluppo per i reflui agro-zootecnici:

- i digestori CSTR a cupola fissa (Cina);
- i digestori CSTR a cupola mobile (India);
- i digestori plug-flow tubolari (Plöchl e Heiermann, 2006).

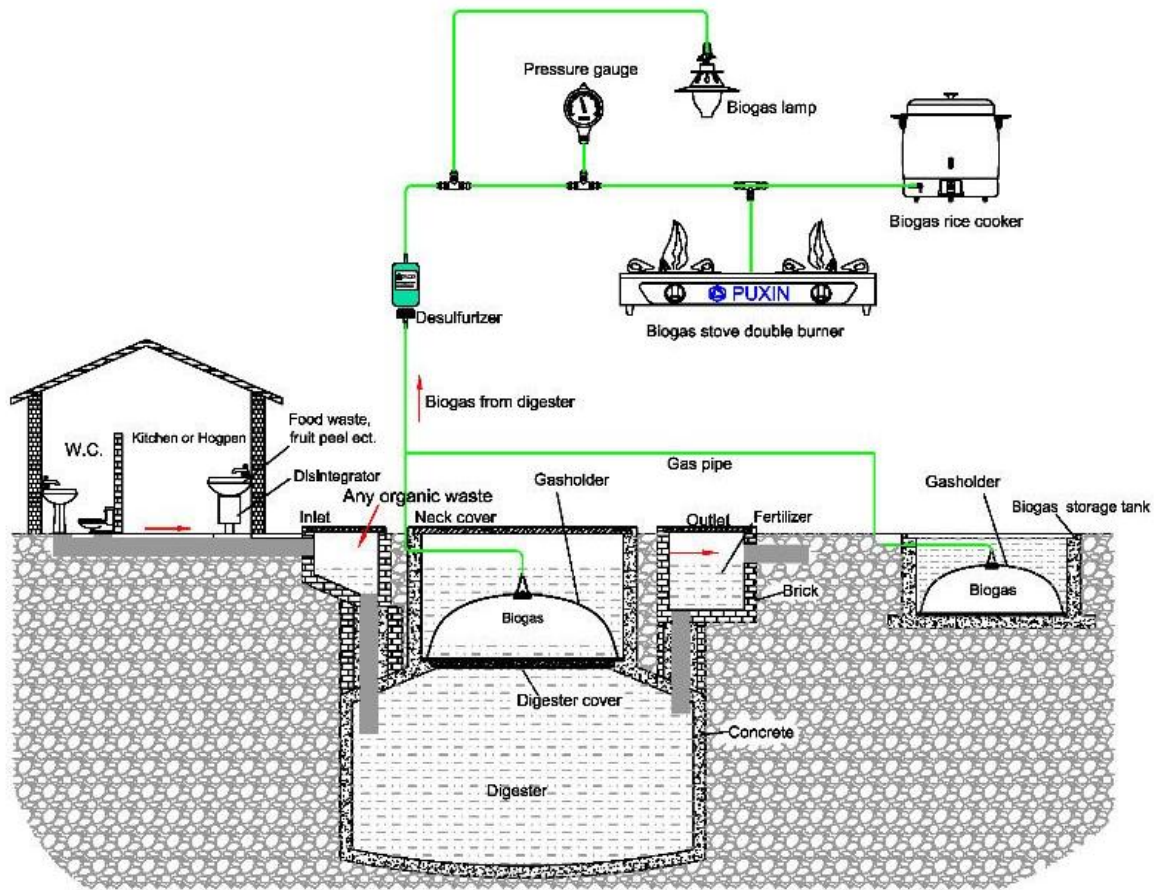



Figura 2.6 – Schema complessivo del processo di produzione di biogas mediante la configurazione cinese

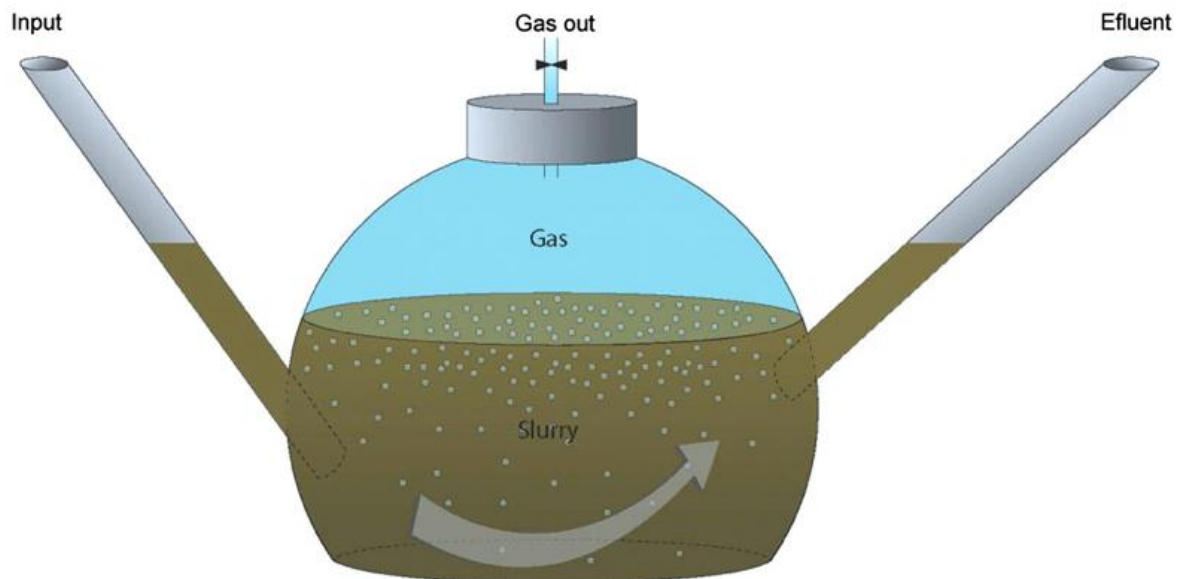



Figura 2.7 – Dettaglio del reattore anaerobico a cupola fissa, modello cinese

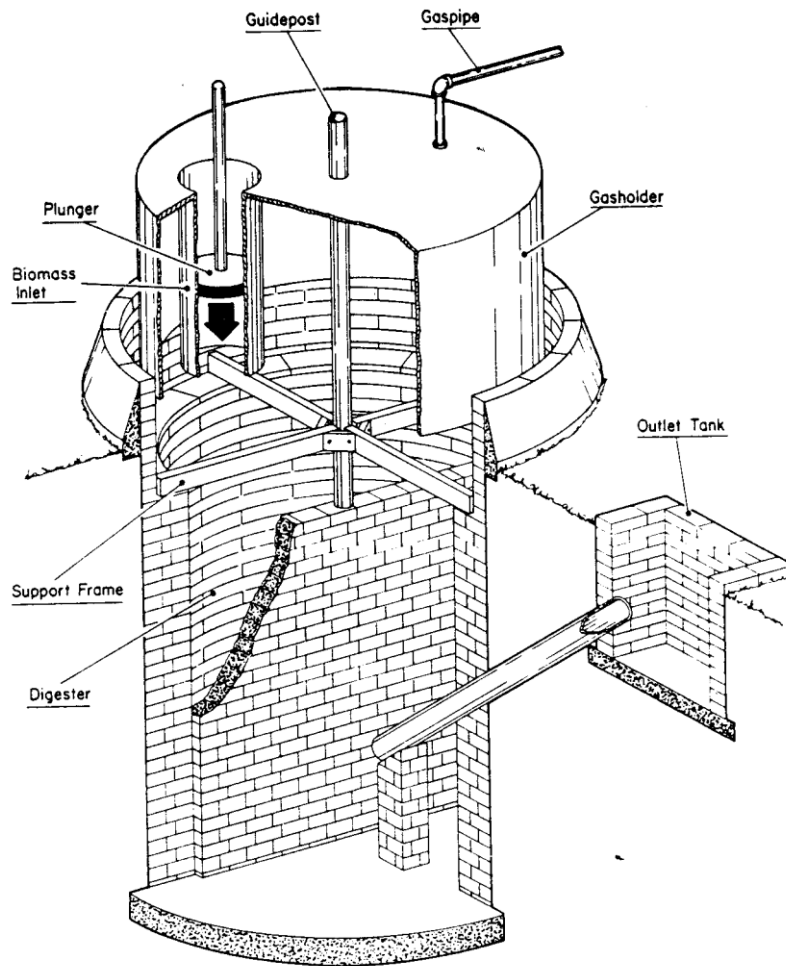



Figura 2.8 – Digestore a cupola mobile, modello indiano

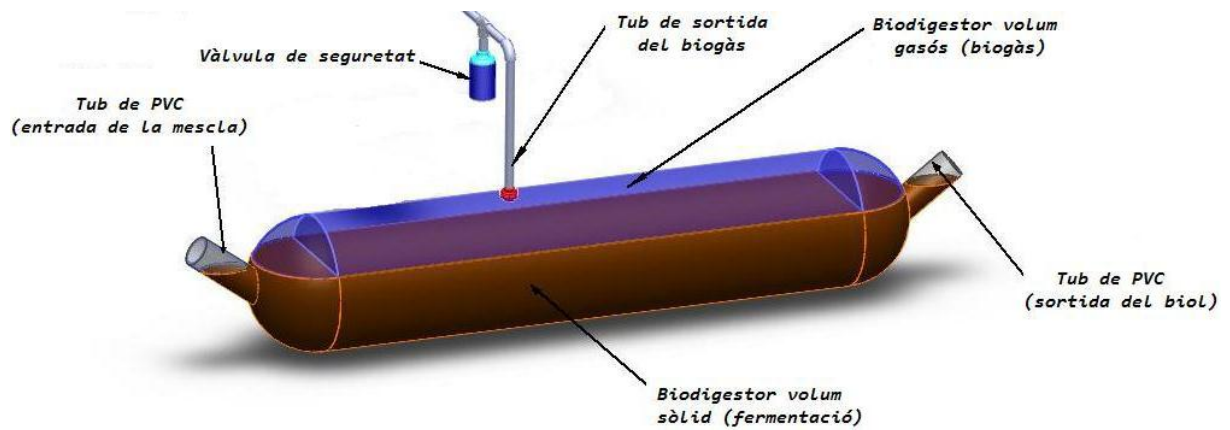



Figura 2.9 – Digestore in materiale plastico con flusso a pistone

Tali digestori solitamente sono dimensionati per essere alimentati da reflui di origine domestica (sia umana che animale) e atti a consentire il soddisfacimento della domanda energetica del nucleo familiare. In pratica questo significa volumi compresi tra 2 e 10 m^3 e con una produttività media di circa 0.5 m^3 biogas per metro cubo di digestore (Dutta et al., 1997; Omer e Fadalla, 2003). I digestori a cupola mobile sono normalmente realizzati in calcestruzzo e acciaio, mentre quelli a cupola fissa sono costruiti con vari materiali disponibili, come per esempio mattoni. I digestori tubolari invece sono fabbricati con pellicole di polietilene.

Anche se in teoria qualsiasi tipo di biomassa può essere degradata a biogas, la crescita vertiginosa nella tecnologia di produzione di biogas in Cina e in India si è basata sul letame suino e su quello bovino, rispettivamente. Lo sterco dei bovini è particolarmente adatto come substrato per la presenza di batteri metanigeni negli stomaci dei ruminanti. La produzione di biogas per rifornire una famiglia di cinque membri con due pasti cucinati al giorno è di 1500-2400 L (ISAT/GTZ, 1999). Prendendo il valore inferiore come riferimento, ciò indicherebbe un apporto minimo derivante da:

- un suino;
- cinque mucche;
- 130 polli;
- 35 persone.

Un rapporto carbonio/azoto tra 20 e 30 è stato individuato per la produzione di biogas con una composizione ottimale (das Neves et al., 2009). Substrati con eccessivo carbonio o azoto possono causare scarse prestazioni ed una produzione di biogas con un contenuto elevato di anidride carbonica. Paglia e urina sono esempi di risorse di biomassa con alto tenore di carbonio e azoto, rispettivamente. Specialmente in Europa c'è stato interesse per le colture energetiche coltivate come substrati. Queste includono il mais (Zea mays), segale (Secale cereale), triticale (Triticum Secale), barbabietola (Beta vulgaris) ed orzo (Hordeum vulgare), mentre canapa (Cannabis sativa) ed erba medica (“alfalfa”, Medicago sativa) si sono dimostrate promettenti (Plöchl e Heiermann, 2006). Piante quali orzo e mais hanno rese di biogas simili a rifiuti di origine animale.

Un'altra proprietà importante è il contenuto di solidi. Reflui con un contenuto in solidi del 5% al 10% sono adatti per l'uso in digestori domestici a basso costo (Sasse, 1988). Per questo motivo, tipicamente è necessario diluire il substrato con una determinata dose di acqua. Diversi studi hanno dimostrato che la codigestione spesso comporta delle rese di produzione di biogas maggiori di quelle che ci si aspetterebbe sulla base del potenziale metanigeno delle componenti prese singolarmente (questo a causa di una meccanismo sinergico).

Utilizzare biogas come carburante per alimentare motori a combustione e a sua volta un generatore elettrico, è un mezzo collaudato di produzione di energia elettrica, data la vasta disponibilità di generatori adattabili. Siccome l'idrogeno solforato può corrodere alcune componenti meccaniche, è tipico, per controllare la sua presenza nel flusso in uscita dal digestore, mettere in contatto il biogas con sali ferrosi in un filtro. In alternativa può essere iniettata una piccola quantità di aria nello spazio di testa del digestore per facilitare l'ossidazione biochimica del solfuro di idrogeno (Dimpl, 2010). La rimozione dell'acqua è ottenuta mediante raffreddamento, come in un tubo sotterraneo, per condensare l'umidità.

Il biogas brucia con una fiamma blu, pulita e pertanto i fornelli da cucina sono considerati il miglior mezzo di sfruttamento del biogas nelle aree rurali dei paesi in via di sviluppo (ISAT/GTZ, 1999). A causa delle proprietà fisico-chimiche del biogas, i bruciatori di propano e butano commerciale non sono adatti per il biogas, senza alcuna modifica, poiché 6 litri di aria sono necessari per la combustione di un litro di biogas (ipotizzando una composizione di metano del 60%) rispetto ai 31 litri e 24 litri di aria per butano e propano.

Tabella 2.10 – Caratteristiche dei differenti combustibili

Tipologia di gas	***Composizione***		***Potere calorifico***	***Velocità di fiamma***	***Domanda di aria***
	Componente	***%***	***kWh / m³***	***cm / s***	***m³ aria / m³ gas***
Metano	CH_4	100	9.94	43	9.5
Propano	C_3H_8	100	25.96	57	23.8
Butano	C_4H_{10}	100	34.02	45	30.9
Gas naturale	CH4 : H2	65 / 35	7.52	60	7
GPL	$H_2 : CH_4 : N_2$	50 / 26 / 24	4.07	82	3.7
Biogas	$CH_4 : CO_2$	60 / 40	5.96	40	5.7

L'efficienza delle cucine a biogas è stata valutata intorno a 20-56% (Itodo et al., 2007;, ISAT/GTZ, 1999), anche se tali cifre sono fortemente influenzate da condizioni di funzionamento e design dei bruciatori. Inoltre, molti benefici per la salute possono derivare dal passaggio dai carburanti tradizionali ai più puliti. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Salute (WHO) oltre 3 miliardi di persone in tutto il mondo continuano a utilizzare combustibili solidi, tra cui legno, sterco e residui agricoli e carbone, per fornire loro l'energia di cui hanno bisogno (WHO, 2011). La cottura delle pietanze con combustibili solidi in caminetti o stufe tradizionali ha ripercussioni sugli elevati livelli di inquinamento atmosferico, a causa di sostanze inquinanti quali polveri, ceneri e monossido di carbonio. L'inquinamento dell'aria indoor, una percentuale significativa del quale è generata dalle stufe di cottura tradizionali, è pensato essere responsabile del 2,7% del carico totale globale di malattie (WHO, 2011).

3. Materiali e metodi

3.1. Introduzione alla tecnologia dei digestori tubolari in materiale plastico: PTD "Plastic Tubular Digester"

La produzione di biogas da digestione anaerobica di materia organica è effettuata mediante un sistema di operazioni e tecnologie diverse:

- Raccolta e trasporto del refluo;
- Digestione anaerobica nel reattore;
- Conservazione e uso del fertilizzante liquido;
- Trasporto, stoccaggio e utilizzo del biogas.

Un contenitore sigillato per mantenere l'ambiente al suo interno in condizioni anaerobiche e dotato di una uscita per estrarre il biogas prodotto è la base per qualsiasi digestore. Un digestore tubolare è essenzialmente un cilindro allungato, ad alimentazione continua e nel quale il refluo si muove con un flusso di tipo "a pistone": il refluo viene alimentato da un lato, mentre da quello opposto esce circa una pari volumetria di digestato in forma liquida. Con questo tipo di digestore, nell'effluente si perde continuamente una certa quantità di biomassa batterica. Questo implica che una parte del materiale organico è utilizzata per la sintesi di nuova biomassa batterica, riducendo la quantità di materia organica che viene convertita in biogas. Il PTD quindi, come anche gli altri digestori rurali tradizionali (modelli cinese ed indù), è meno efficiente nella produzione di biogas rispetto ai digestori in grado di trattenere le biomasse batteriche al loro interno. Il digestore è installato sotto il livello del piano campagna, in una fossa, per mantenere la forma cilindrica e scaricare il peso del fluido sulle pareti della medesima. Parte del volume è occupato da fluido in digestione mentre sulla parte superiore del digestore si accumula il biogas prodotto. Se si decide di installare un gasometro a parte per immagazzinare il gas, è possibile sfruttare fino a 90% del volume totale del digestore per la digestione della miscela.

Il modello PTD, realizzato a Taiwan alla fine degli anni sessanta, nacque come alternativa ai digestori in metallo o cemento, che presentavano e tuttora presentano le seguenti limitazioni:

- Elevati costi di installazione. In generale la diffusione di questi digestori è diventata possibile grazie al supporto e sussidi governativi (caso di Cina e India);
- Difficoltà tecnica nella costruzione del digestore: realizzata proficuamente solo da personale qualificato;
- Difficoltà di manutenzione e sostituzione di parti del digestore, per il difficile reperimento di alcuni materiali e le competenze necessarie;

- Necessità di una efficiente organizzazione centrale che preveda momenti di formazione.

All'inizio il digestore tubolare era costruito in neoprene o altre membrane ricavate dagli scarti della produzione di alluminio. La lamina è saldata termicamente per darle la forma tubolare. L'operazione di saldatura deve essere effettuata con cura per evitare qualsiasi fuoriuscita di liquidi o gas durante il funzionamento del digestore e necessita di macchinari particolari di scarsa diffusione. Negli anni successivi si è iniziato a lavorare con PVC; il digestore viene costruito unendo diverse membrane di PVC mediante saldatura o incollaggio. Uno dei vantaggi del PVC consiste proprio nella disponibilità di materiali collanti sufficientemente forti.

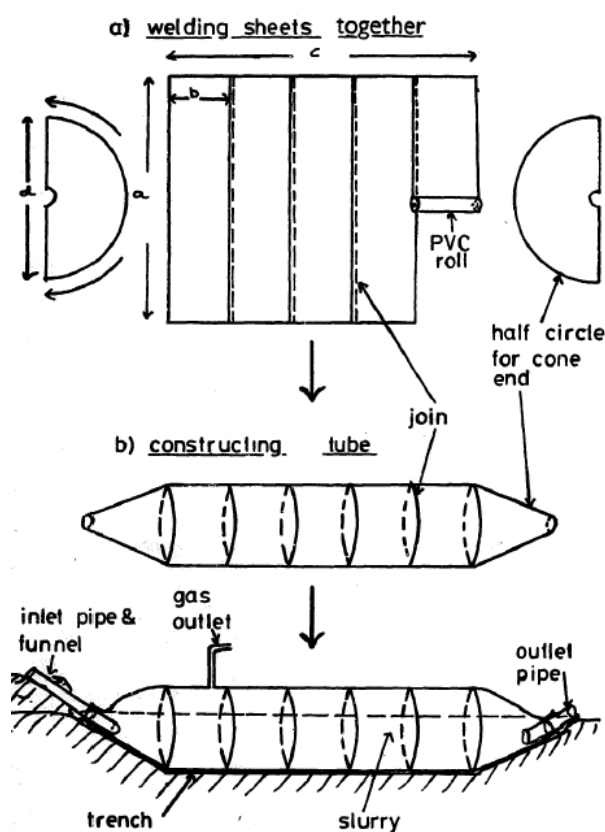



Figura 3.1 – Assemblaggio del digestore in materiale plastico

Il design è stato in seguito ulteriormente semplificato, in progetti effettuati in Etiopia, Colombia e Vietnam da Thomas Preston ed i suoi colleghi. Questo tipo di digestore prevede l’impiego di fogli di polietilene a bassa densità (LDPE), che hanno il vantaggio di poter essere prodotti già in forma tubolare, evitando così il problema della saldatura.

3.2. Caratteristiche del digestore tubolare

Questa sezione descrive le caratteristiche del digestore tubolare e ove possibile in relazione ad altri tipi di digestori. L'obiettivo è stato quello di verificare la possibilità della digestione anaerobica nelle condizioni climatiche, ambientali ed economiche dell'altopiano andino.

3.2.1. Tipo di alimentazione

Quando i reflui sono prodotti quotidianamente, come nel caso dei reflui di origine zootecnica, è conveniente dotarsi di un digestore continuo, in cui l'alimentazione può tenere il passo con la produzione di rifiuti, in modo tale che essi siano alimentati freschi. Una preventiva fase di accumulo dei reflui comporta una degradazione incontrollata della sostanza organica convertibile in biogas (riducendo quindi le potenzialità dell'impianto) ed una volatilizzazione dei composti azotati, in particolare ammoniaca (con conseguente diminuzione delle qualità fertilizzanti del digestato). I digestori continui inoltre garantiscono una produzione costante di biogas, mentre nei digestori batch la produzione diminuisce con il grado di avanzamento del processo. Per ovviare a questa fluttuazione della produzione nel caso batch, è possibile installare una batteria di digestori funzionanti in parallelo, con un conseguente aggravio gestionale rispetto a un digestore di tipo continuo. Digestori continui sono preferibili quando il substrato ha già una quantità elevata di umidità, come nel caso deiezioni animali, mentre i batch sono preferibili in caso di digestione a secco (contenuto di solidi totali superiore al 25%).

3.2.2. Tipo di flusso

Nel digestore tubolare in materiale plastico, i reflui si muovono con un flusso di tipo "a pistone". Idrolisi e acidogenesi del substrato si verificano principalmente all'inizio del digestore, mentre la produzione di metano va aumentando lungo il reattore. In un digestore tubolare, la concentrazione del substrato è massima in prossimità dell'ingresso, per andare diminuendo lungo il digestore. In digestori completamente miscelati, come i modelli cinesi e indiani, la concentrazione del substrato è invece uniforme in tutto il reattore. Alcune reazioni, come l'idrolisi, presentano una velocità che aumenta proporzionalmente alla concentrazione del substrato e a questo proposito il flusso a pistone è preferibile. Il modello plug-flow evita anche la possibilità di corto circuito del residuo tra ingresso e uscita e, nel caso in cui l'influente contenga eccezionalmente qualsiasi sostanza tossica, la diffusione della tossicità sarà inferiore, evitando così di inibire tutta la biomassa batterica, come nel caso di un digestore completamente miscelato. Il rapporto lunghezza/diametro (L/d) è solitamente fra 3:1 e 10:1. Un PTD eccessivamente stretto non consente un sufficiente contatto tra l'influente ed i batteri metanigeni contenuti nel digestore. Un PTD

eccessivamente ampio non consentirà un flusso a pistone ed implicherà un maggior rischio di cortocircuitazione dell'influente.

3.2.3. Disposizione

I digestori rurali possono essere divisi tra verticali ed orizzontali, ed entrambi i tipi sono di solito interrati. Digestori in superficie consentono una manutenzione più agevole, tuttavia necessitano dell'impiego di materiali molto resistenti come l'acciaio, per sopportare la pressione e sono più esposti alle variazioni climatiche. Interrando un digestore si può beneficiare dell'importante vantaggio di alimentare il substrato per gravità, senza bisogno di impianti di sollevamento. Un digestore orizzontale interrato, rispetto ad uno verticale, presenta le seguenti caratteristiche:

- È adatto quando non è possibile scavare troppo in profondità, per la presenza di uno strato roccioso o l'intercettazione della linea di falda;
- Necessita di superfici di installazione maggiori. Questo può rappresentare un problema quando le metrature di terreno disponibile sono ridotte;
- Per quanto riguarda un digestore verticale di uguale volume, ha una superficie più grande esposta all'atmosfera, e quindi il suo isolamento è minore. Può essere un vantaggio nel caso di regioni assolate per aumentare la temperatura interna del digestore;
- Il refluo in digestione, tende a formare una crosta di materiale fibroso che galleggia al di sopra del pelo libero della fase liquida; addensandosi, tale crosta crea una barriera alla risalita del biogas verso la volta del digestore ed il circuito di adduzione del biogas al gasometro. I digestori orizzontali offrono una superficie di separazione maggiore, a parità di volume di liquido, e conseguentemente lo spessore della crosta risulta minore e di più facile attraversamento o destabilizzazione.

3.2.4. Agitazione

L'agitazione del refluo ha un certo numero di vantaggi:

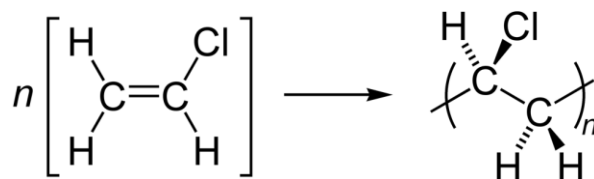
- Riduce la formazione della crosta;
- Limita la sedimentazione degli inerti, che riducono lo spazio per la digestione;
- Elimina la stratificazione termica, che può essere problematica in un PTD esposto direttamente al Sole;
- Favorisce la dispersione dei metaboliti e il contatto tra microrganismi e substrato;
- Riduce la dimensione degli aggregati e particelle che presentano bassa superficie specifica.

Affinché l'agitazione sia efficiente, dovrebbe essere prolungata per un considerevole periodo di tempo, generando un dispendio di energia non trascurabile. L'agitazione manuale occasionale presenta minori vantaggi.

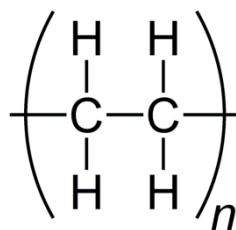
3.2.5. Materiali impiegati per la costruzione

Nell'ottica di sviluppare una tecnologia appropriata, è importante che i materiali utilizzati siano normalmente disponibili nella zona, ad un costo accessibile, e che il loro utilizzo non rappresenti un rischio per la salute e l'ambiente. Si riportano di seguito i principali materiali impiegati per la costruzione dell'impianto e le parti del sistema in essi realizzati:

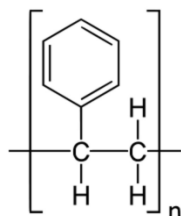
- Cloruro di polivinile PVC:
    - Digestore in geomembrana dello spessore di 1 mm;
    - Gasometro in geomembrana dello spessore di 0.6 mm;
    - Tubazioni di alimentazione refluo ed estrazione digestato dello spessore di 3 mm;
    - Tubazioni di convogliamento biogas dello spessore di 3 mm;
- Polietilene a bassa densità per isolamento termico e igroscopico a contatto con le pareti della fossa;
- Polistirene espanso per isolamento termico a contatto diretto con il digestore tubolare;
- Pietre e mattoni in terra cruda (*adobes*) per realizzare la struttura della serra;
- Listoni in legno di eucalipto per la realizzazione dell'intelaiatura del tetto della serra;
- Polietilene a bassa densità per realizzare le falde del tetto della serra, consentendo alla rediazione solare di penetrare e riscaldare il digestore;
- Paglietta in ferro da impiegare come filtro per l'idrogeno solforato;
- Cemento e laterizi per la costruzione dei pozzetti di carico e scarico.

PVC

Il cloruro di polivinile, noto anche come polivinilcloruro o con la corrispondente sigla PVC, è il polimero del cloruro di vinile. È il polimero più importante della serie ottenuta da monomeri vinilici ed è una delle materie plastiche di maggior consumo al mondo. Puro, è

un materiale rigido; deve la sua versatilità applicativa alla possibilità di essere miscelato anche in proporzioni elevate a composti inorganici e a prodotti plastificanti, quali ad esempio gli esteri dell'acido ftalico, che lo rendono flessibile e modellabile. Viene considerato stabile e sicuro nelle applicazioni tecnologiche a temperatura ambiente, ma estremamente pericoloso se bruciato o scaldato ad elevate temperature e in impianti inidonei al suo trattamento per via della presenza di cloro nella molecola, che può liberarsi come HCl, come diossina, o come cloruro di vinile monomero. Plastica riciclabile, a codice SPI 3, il PVC viene recuperato solo parzialmente per via degli alti costi di trattamento.

Polietilene a bassa densità

Il polietilene a bassa densità è definito da un intervallo di densità di 0,910 - 0,940 g/cm^3. Non reagisce a temperatura ambiente, tranne che con forti agenti ossidanti, e alcuni solventi causano rigonfiamento. Può sopportare temperature di 80 °C continuamente e di 95 °C per un breve periodo. Fabbricato in varietà traslucide od opache, è abbastanza flessibile e resistente. Ha un'ottima impermeabilità all'acqua. L'LDPE contiene, come elementi chimici, carbonio e idrogeno. L'LDPE ha più ramificazioni (sul 2% circa degli atomi di carbonio) del polietilene ad alta densità (HDPE, high-density polyethylene), così le sue forze intermolecolari (attrazione tra dipolo istantaneo e dipolo indotto) sono più deboli, la resistenza alla trazione è minore e la resilienza è maggiore. Inoltre, siccome le sue molecole sono impaccate meno strettamente e sono meno cristalline per le ramificazioni laterali, la sua densità è minore.

- Resistenza eccellente (non subisce attacchi) a soluzioni diluite e concentrate di acidi, alcoli, basi ed esteri;
- Buona resistenza (attacchi minori) ad aldeidi, chetoni ed oli vegetali;
- Resistenza limitata (attacchi moderati adatti solo per utilizzi a breve termine) ad idrocarburi alifatici ed aromatici, oli minerali ed agenti ossidanti;
- Resistenza scarsa agli idrocarburi alogenati, non se ne raccomanda l'uso.

Polistirene

Il polistirene (chiamato polistirolo da molti, anche se erroneamente) è il polimero dello stirene. È un polimero aromatico termoplastico dalla struttura lineare. A temperatura ambiente è un solido vetroso; al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa, circa 100 °C, acquisisce plasticità ed è in grado di fluire; comincia a decomporsi alla temperatura di 270 °C. Il polistirene espanso si presenta in forma di schiuma bianca leggerissima, spesso modellata in sferette o chips, e viene usato per l'imballaggio e l'isolamento. L'espanso trova ampio uso nella produzione di imballaggi. Inoltre, essendo un isolante termico è molto usato in edilizia per l'isolamento degli edifici e nella realizzazione di pannellature isolanti o per il cosiddetto "isolamento a cappotto".

Adobes

Adobe è l'impasto di argilla, sabbia e paglia essiccata al Sole utilizzata da molte popolazioni in ogni epoca per costruire mattoni. Si fabbrica con terra argillosa e acqua, usando uno stampo, e si lascia essiccare al Sole. L'adobe ha un'importante comportamento termico che gli permette di mantenere il calore durante l'inverno e rilasciarlo durante l'estate, mantenendo una temperatura fresca in tutte le stagioni. Può sciogliersi con la pioggia, per cui generalmente richiede una manutenzione continua che solitamente si effettua con strati di fango. Non è corretto invece realizzare la protezione con impasto di cemento, dato che lo strato risultante risulta poco permeabile al vapor d'acqua e conserva l'umidità interna, per cui si potrebbe provocare lo sfaldamento dell'adobe dall'interno. Naturalmente l'adobe è molto economico e permette di fabbricarsi da soli i materiali per costruire la propria casa. Anticamente (tradizione ancora in uso nelle comunità campesine andine), nei giorni nei quali non c'erano attività da svolgere nei campi, i lavoratori fabbricavano mattoni di adobe, che poi venivano venduti a chi avesse avuto intenzione di costruirsi una casa.

Legno di eucalipto

- Nome: *Eucalyptus globulu* (Blue Gum);
- Origine: cresce nel Sud-Est asiatico, tra il Nuovo Galles del Sud e la Tasmania. È stato importato alla fine del secolo XIX dall'Australia, per arginare il dissesto

idrogeologico – date le robuste e profonde radici – e come materiale da costruzione delle traversine della rete ferroviaria, allora in costruzione;

- Colore del legno: il durame ha un colore variabile dal beige al marrone chiaro, con una sfumatura tendente al rosa. L'alburno è molto chiaro/pallido;
- Densità media: 720 kg/m^3;
- Proprietà: il legno asciuga bene e rapidamente, anche se tende a fessurarsi durante l'asciugatura. Inoltre il legno tende anche a deformarsi durante l'asciugatura;
- Lavorazione: il legno è facilmente lavorabile. I chiodi e le viti hanno una buona tenuta. L'eucalipto produce delle buone giunture con l'incollaggio;
- Impiego esterno: porte, finestre. L'eucalipto, nella costruzione degli interni, è usato per i pavimenti.

3.2.6. Installazione e costi

L'installazione del digestore tubolare plastico (PTD) può essere effettuata autonomamente dall'utente senza la necessità di consulenza tecnica diretta. Tutte le operazioni possono essere eseguite manualmente, con il supporto di strumenti comuni e due persone possono installare un digestore familiare (5-10 m^3) in 2-3 giorni. La semplicità di costruzione permette una trasmissione diretta della conoscenza/esperienza da campesino a campesino. Al contrario, un digestore come il modello cinese richiede l'aiuto di esperti per eseguire correttamente l'installazione ed allo stesso tempo aumentano i costi di installazione. Il costo di installazione è la caratteristica più importante del digestore tubolare in materiale plastico. Il basso costo è dovuto al tipo e alla quantità dei materiali utilizzati e al fatto che l'installazione può essere eseguita direttamente dall'utente, grazie all'iniziativa privata dei contadini, senza sostegno economico da parte di governi o ONG (anche se va notato che nei casi di più grave povertà, l'installazione del PTD è ancora economicamente impraticabile). Questo aspetto è importante quando si pianifica l'eventuale diffusione di PTD nelle Comunità andine, al fine di evitare che la diffusione della tecnologia sia un'altra causa delle differenze tra le condizioni di vita tra i membri della stessa comunità.

3.2.7. Uso e manutenzione

- L’uso del digestore si apprende intuitivamente. La quantità di biogas prodotta giornalmente può essere facilmente determinata anche a livello visivo tramite lo stato di insufflazione del digestore e del gasometro (nonché basandosi sul tempo a disposizione per cucinare); questo può aiutare nella diffusione e accettazione della tecnologia.
- La quantità di lavoro giornaliero dipende da una serie di aspetti:
    - tipo del digestore;
    - tipologia di substrato alimentato;
    - posizione del digestore rispetto alle stalle;
    - topografia della zona rurale;
    - disponibilità di acqua con cui diluire le deiezioni.

- A causa della loro fragilità, i PTD hanno bisogno di maggiori protezioni e attenzione per evitare che gli animali, bambini, oggetti, fenomeni atmosferici possano danneggiare la struttura;
- L'utente può facilmente riparare piccoli tagli e fori nell’involucro di plastica che costituisce il digestore applicando qualsiasi nastro adesivo o patch con adesivo. Sono soluzioni temporanee e che non restituiscono al PTD la sua piena funzionalità, ma sono tecniche economiche per qualsiasi utente;
- Qualsiasi digestore non miscelato comporta un graduale accumulo di solidi inerti e non degradabili al suo interno per l’instaurarsi di fenomeni di sedimentazione. Nel corso del tempo questo strato può venire ad occupare una frazione considerevole del volume del digestore, rendendo necessaria una pulizia dello stesso. Nel caso di PTD non è possibile introdurre dispositivi all’interno del digestore per svuotarlo, per il rischio di danni alla struttura. L’allontanamento dei solidi sedimentati avviene allora tramite una tubazione collocata in corrispondenza del fondo e munita di apposito rubinetto.

Nonostante le semplici operazioni di manutenzione illustrate, la vita utile del digestore dipende fortemente dalla avversità delle condizioni meteo-climatiche e dalla cura con cui viene maneggiato. La scarsa durabilità dei materiali impiegati, che rende il costo dell’impianto accessibile, costituisce lo svantaggio maggiore di questo tipo di tecnologia.

3.3. Procedimento per la progettazione di un digestore di tipo tubolare plug-flow

1. Determinare il quantitativo di substrato a disposizione oppure le necessità energetiche del nucleo familiare servito dal futuro impianto a biogas.

Tipicamente la comunità rurale della regione di Apurimac dispone di un esiguo numero di capi di bestiamo bovino o suino. L'attività di allevamento di *cuy* (porcellini d'India) costituisce invece una abitudine ben radicata nella cultura quechua. Non è raro inoltre che alcune famiglie dispongano di un certo numero di ovini o pollame. Tuttavia, in prima analisi, la produzione di biogas può essere avviata solamente a partire da letame di origine bovina, suina e di cuy, i cui escrementi rappresentano il contributo quantitativo maggioritario. Di seguito, in Tabella 3.1 vengono elencate le principali caratteristiche delle differenti matrici avviabili a digestione anaerobica disponibili sul territorio esaminato.

Tabella 3.1 – Caratteristiche medie delle principali biomasse di scarto avviabili a digestione anaerobica (Fonte: OEKOTOP)

Substrato	*% ST (sul tal quale)*	*% SV (sui ST)*	*L biogas / kg SV*	*% CH_4*
Bovino	17	13	250	65
Suino	16	12	350	67
Ovino	30	20	200	
Equino	25	15	250	
Pollame	25	17	400	60
Porcellino d'India	68			
Deiezioni umane	20	15	300	
Paglia di riso	89	93	220	
Paglia di grano	82	94	250	55
Buccia di mais	80	91	410	59
Erba fresca	24	89	410	58
Giacinto d'acqua	7	75	325	52
Pula	65	78	160	
Residui di verdura	12	86	350	65
Residui di cucina	15	10	250	50

Per quanto riguarda le necessità energetiche medie di una famiglia apurimeña, il cui nucleo è composto da 4-5 individui, si può pensare che, come ordine di grandezza, il fabbisogno giornaliero possa essere soddisfatto da circa 1 m^3 di biogas. Tendenzialmente tale biogas

verrà impiegato in cucina con un sistema di bruciatori opportunamente adattati per poter funzionare con quest'ultimo.

- Il primo digestore installato è stato dimensionato sulla base del letame proveniente da un allevamento di maiali costituito a regime da 7 capi;
- Il secondo digestore installato è stato dimensionato sulla base dello sterco proveniente da una allevamento che a regime conterà 700 porcellini d'India.

2. A seconda della tipologia di substrato è necessario calcolare un opportuno fattore di diluizione; generalmente la proporzione tra acqua e sterco costituenti la miscela alimentata, è compresa tra 3:1 e 4:1 in peso. Per i digestori tubolari con schema "plug-flow" usualmente viene adottata una percentuale di solidi totali nella miscela compresa tra 3% e 5%. Date le caratteristiche medie dei substrati, ed in particolare il contenuto di solidi totali (riportati in Tabella 3.1), appare evidente come tali valori obiettivo in termini di %ST, possano essere raggiunti mediante diluizione con acqua.

- Per il primo digestore è stato adottato un rapporto acqua/sterco pari a 3:1.
- Per il secondo digestore si è mantenuto tale rapporto, tuttavia in questo caso, lo sterco di cuy, molto ricco di solidi totali, necessità di un periodo di pre-fermentazione.

Sia in fase di dimensionamento, sia in fase di verifica, è possibile determinare rispettivamente il rapporto acqua/sterco appropriato e la percentuale di solidi totali con cui si sta caricando l'impianto, mediante la seguente relazione, che deriva da un semplice bilancio di massa:

$$\%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{miscela}} = \frac{\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{sterco}} \cdot \%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{sterco}}}{\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{miscela}}} = \frac{\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{sterco}} \cdot \%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{sterco}}}{\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{sterco}} + \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{acqua}}}$$

$$\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{acqua}} = \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{sterco}} \cdot \left(\frac{\%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{sterco}} - \%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{miscela}}}{\%\boldsymbol{ST}_{\boldsymbol{miscela}}}\right)$$

Il bilancio di massa è condotto nell'ipotesi di impiego di acqua di rete a cui viene attribuito un contenuto di solidi totali nullo; già di per se questa assunzione è causa di errore in quanto le acque approvvigionate per uso irriguo provengono dal fiume che scorre a margine del paese e della fattoria (Figura 3.2). Pertanto si sta trascurando il contenuto di solidi trasportati dalla corrente d'acqua per effetto dei fenomeni di erosione esercitati dal fluido in movimento nei confronti di rocce e altro materiale depositato sul greto. L'approssimazione si fa più acuta nel momento in cui, come in realtà accade, la componente liquida alimentata al digestore, sia carica di urine animali.

Figura 3.2 – Vista del Rio Apurimac dalla Granja Alfacancha di Vilcabamba

- Durante le operazioni di lavaggio delle stalle dei suini, tramite una pompa viene iniettata acqua di rete (proveniente dal fiume) che si mescola alle urine e trascina lo sterco – depositatosi durante la giornata sulla piazzola impermeabile in cemento, realizzata con una leggera cadente topografica – verso una pozza impermeabile di raccolta, ove avviene la fase di prelievo della miscela.
- Per quanto riguarda i porcellini d'India, essi sono allevati all'interno di gabbie multi-piano in legno (Figura 3.3); sul fondo di ciascun livello, è predisposta una griglia che dovrebbe trattenere l'erba medica (alfalfa) di cui tali roditori principalmente si nutrono, e lasciar filtrare solamente le deiezioni. Al di sotto di tale griglia è presente un vassoio metallico con la funzione di scivolo, e lo scopo di convogliare tali residui verso un sistema di tubazioni interconnesse che deviano il flusso e lo raccolgono ad una estremità delle gabbie. Lo sterco, dunque, si trova da subito a mollo nelle urine, nelle quali rimane per un prefissato periodo di tempo in fase di pre-fermentazione.

Figura 3.3 – Gabbie multi-piano per allevamento di porcellini d'India

3. Determinazione del tempo di ritenzione idraulica (HRT). Nel caso di modelli semplici, in cui non è previsto un ricircolo, HRT corrisponde al tempo di effettiva permanenza del materiale degradabile all'interno del reattore. Pertanto, tale tempo dipende dalla natura del substrato e, sopratutto, dall'andamento delle temperature nel contesto territoriale in cui sarà ubicato il digestore. Vilcabamba, situata ad una quota di circa 2800 m s.l.m., è caratterizzata da una forte escursione termica durante il corso della giornata; per la regione geografica in cui è collocata, è stato adottato un tempo di ritenzione idraulia di 60 giorni circa.

4. Determinazione della percentuale di volume del reattore occupato dalla miscela in digestione e dal biogas. È consigliabile mantenere lo stesso rapporto esistente tra la frazione liquida e la frazione solida alimentate; l'ipotesi sotto la quale si opera è la seguente: un volume corrispondente a quello dei solidi totali presenti nel substrato viene convertito in biogas. Tale assunzione è evidentemente conservativa, a favore di sicurezza: infatti come è ben noto, solo la frazione di solidi volatili (sicuramente inferiore a quelli totali) rappresentante in prima approssimazione la componente organica, è suscettibile di degradazione biologica. Da quanto sopra detto, consegue che il 75% del volume del digestore sarà adibito a vasca di degradazione/sedimentazione della miscela, mentre il restante 25% fungerà da cupola gasometrica.

5. Sulla base dei dati precedentemente raccolti e discussi è possibile calcolare la volumetria del digestore:

Tabella 3.2 – Parametri di funzionamento del 1° digestore

1° digestore

Animali allevati	Unità a regime	Peso vivo per animale (kg)	% sterco su peso vivo	Kg sterco/unità animali/giorno	kg sterco/ allevamento/ giorno
maiali	7	70	6.50%	4.55	31.85

Kg ST/kg sterco pre fermentazione	kg ST/kg sterco	kg ST/allevamento/giorno	kg SV/kg sterco	kg SV/allevamento/giorno
/	16.00%	5.096	12.00%	3.822

kg SV/kg ST	L biogas/kg SV	L biogas/kg sterco	L biogas	kg acqua di diluizione
75.00%	350	42	1338	95.55

kg miscela alimentata	HRT (giorni)	Volume occupato dalla frazione liquida (L)	Volume occupato dal biogas (L)	Volume totale digestore (L)
127.4	63	8026	2675	10702

Tabella 3.3 – Parametri di funzionamento del 2° digestore

2° digestore					
Animali allevati	Unità a regime	Peso vivo per animale (kg)	% sterco su peso vivo	Kg sterco/unità animali/giorno	kg sterco/ allevamento/ giorno
porcellini d'India	700	1	3.00%	0.03	21

Kg ST/kg sterco pre fermentazione	kg ST/kg sterco	kg ST/allevamento/giorno	kg SV/kg sterco	kg SV/allevamento/giorno
67.00%	/	/	/	/

kg SV/kg ST	L biogas/kg SV	L biogas/kg sterco	L biogas	kg acqua di diluizione
/	/	48.75	1024	63

kg miscela alimentata	HRT (giorni)	Volume occupato dalla frazione liquida (L)	Volume occupato dal biogas (L)	Volume totale digestore (L)
84	60	5040	1680	6720

6. Per determinare i parametri di dimensionamento del digestore e conseguentemente della fossa in cui verrà alloggiato, è necessario tenere in conto i seguenti parametri:

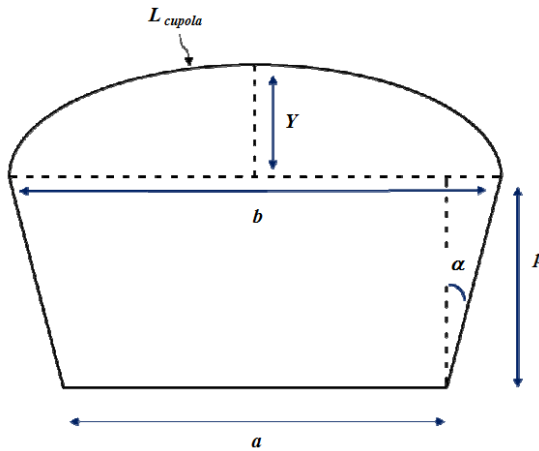



Figura 3.4 – Sezione del digestore alloggiato nella fossa

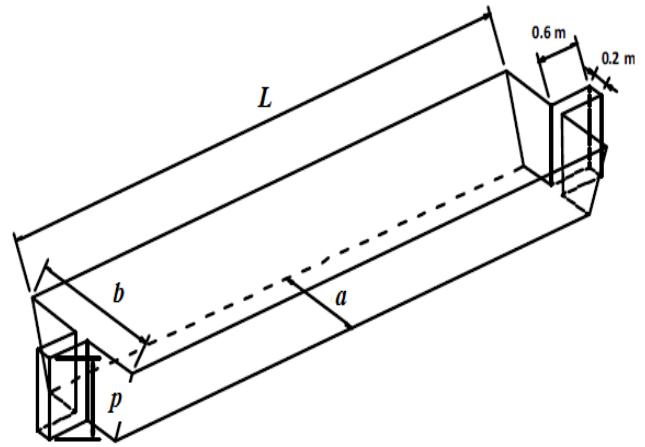



Figura 3.5 – Fossa di alloggiamento del digestore

- È consigliabile che vi sia un rapporto compreso tra 5 e 10 tra la lunghezza ed il diametro del digestore tubolare, in prima approssimazione di forma cilindrica:

$$\mathbf{5 < \left(\eta_{dig} = \frac{L_{dig}}{d_{dig}}\right) < 10}$$

- Il parametro di forma F della cupola gasometrica (pari al rapporto tra la lunghezza della volta e la luce della volta, quest'ultima pari alla larghezza superiore della fossa) deve essere uguale a 1.2:

$$F = \frac{L_{cupola}}{b} = 1.2$$

- Una altezza massima della cupola rispetto al piano campagna compresa tra 30 e 40 centimetri:

$$Y_{min} = 0.3 < Y\ [m] < 0.4 = Y_{max}$$

- L'inclinazione delle pareti longitudinali della fossa deve essere pari a 15°:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b - a}{2 \cdot p}\right) = 15°$$

Nel dimensionamento della fossa di alloggiamento va tenuto in conto lo spessore del materiale impiegato come isolante termico. Per entrambi i digestori è stato adottato uno strato di 10 centimetri in polistirene espanso, appoggiato sul ciascun lato interno della fossa.

Pertanto le dimensioni calcolate per il contenimento del digestore tubolare andranno maggiorate rispettivamente di 20 cm lungo le pareti laterali, e 10 centimetri per quanto riguarda la profondità dello scavo.

Tabella 3.4 – Principali parametri di dimensionamento dei digestori e delle rispettive fosse di alloggiamento

Parametro	*Unità di misura*	*1° digestore*	*1^ fossa*	*2° digestore*	*2^ fossa*
L_{cupola}	m	1.56		1.2	
a	m	0.7	0.9	0.55	0.75
b	m	1.3	1.5	1	1.2
p	m da piano campagna	1	1.1	0.8	0.9
Y	m	36.75		28.4	
a	°		15		15
p/cos(a)	m		1.14		0.93
L	m	8.1	8.3	8.1	8.3
d	m	1.42		1.12	
L/d	/	5.70		7.23	
Volume teorico	m^3	12.83		7.98	
Volume di progetto	m^3	10.8		6.07	
Sovradimensionamento	%	18.78%		31.47%	
pressione di lavoro	cm colonna d'acqua	6		5	

7. Il volume del gasometro viene scelto a seconda delle esigenze di immagazzinamento, tuttavia, è consigliabile dimensionarlo per immagazzinare il 150% del gas prodotto. Altrimenti si può decidere di realizzare un gasometro di volumetria uguale alla cupola gasometrica interna al digestore:

$$1.5 \cdot V_{biogas\ prodotto} < V_{gasometro} < \frac{V_{digestore}}{4}$$

3.4. Fasi costruttive di un digestore tubolare "plug-flow" di basso costo

3.4.1. Ubicazione

La cosa migliore sarebbe individuare un luogo molto soleggiato nei pressi delle stalle, per facilitare le operazioni di trasporto e carico della miscela dal punto di stoccaggio fino al pozzetto di alimentazione, e sufficientemente vicino alla cucina per limitare l'utilizzo di tubi in PVC per convogliare il biogas. Se si desidera alimentare il digestore direttamente dalla zona di stoccaggio del substrato, bisogna prevedere un dislivello topografico di almeno 1.5 metri, tale da consentirne il deflusso con una adeguata cadente (considerando la elevata viscosità dell'ingestato). Inoltre sarebbe opportuno installare il pozzetto di raccolta della frazione liquida del digestato (biol) nelle vicinanze delle coltivazioni che potranno beneficiare della fertirrigazione. Il luogo destinato ad ospitare il digestore deve essere caratterizzato da una topografia ed una composizione degli strati superficiali di terreno, che consentano un rapido assorbimento ed allontanamento dell'acqua piovana (particolarmente abbondante nel periodo che va da Gennaio ad Aprile). In caso contrario sarà utile predisporre un sistema di drenaggio alla base delle pareti di sostegno della struttura in cui sarà alloggiato il digestore. Altro aspetto importante, ai fini della durabilità dell'impianto, è proteggere il digestore dal contatto con animali in grado di danneggiare, prevalentemente, le parti plastiche.

3.4.2. Scavo della fossa di alloggiamento del digestore

La fossa viene realizzata per molteplici ragioni:

- Alloggiare e proteggere il digestore da agenti esterni: per tale motivo le pareti interne e la base – tipicamente realizzate in forma trapezoidale, per dare maggiore stabilità ai carichi – devono essere sottoposte ad un attento "controllo qualità" nei confronti di asperità naturali come spezzoni di roccia o radici;
- L'interranento della quasi totalità del "corpo" del digestore, consente di sfruttare anche le proprietà naturali di isolamento termico del terreno (ovviamente in aggiunta all'effetto isolante operato dal polistirene espanso, comunque necessario);

Lo scavo della fossa non può prescindere dalle successive fasi realizzative; in particolare l'asse longitudinale dello scavo dipende dalla tipologia e orientamento della copertura della serra che avvolgerà il digestore. Il criterio basilare è quello di sfruttare il più possibile l'irraggiamento solare.

- Se si intende realizzare il tetto ad un solo spiovente, sarà necessario orientarlo rivolto verso Nord (ricordiamo che il Perù è situato nell'emisfero australe). Conseguentemente lo scavo della fossa sarà orientato Ovest – Est;

- Se al contrario, il tetto fosse costituito da doppio spiovente – per essere esposto all'irraggiamento su una superficie più ampia, un lato rivolto ad Est e l'altro ad Ovest – lo scavo della fossa dovrà essere orientato Nord – Sud.

La base della fossa deve essere livellata in modo tale da consentire una adeguata messa in opera del digestore: la presenza di una cadente topografica darebbe luogo ad una concentrazione del materiale ispessito all'interno del digestore, verso valle.

Il digestore è dotato di una tubazione di alimentazione e di due tubazioni uscenti (una più in alto per la fuoriuscita della componente liquida del digestato biol ed una più in basso per la frazione solida biosol). In linea teorica, la bocca di uscita del biol deve trovarsi ad una altezza maggiore rispetto alla bocca di ingresso dell'ingestato. Tale configurazione, progettata per un terreno "in bolla", potrebbe variare a seguito della presenza di una cadente, compromettendo il corretto funzionamento del processo "flusso a pistone".

Durante la fase di scavo è opportuno considerare anche la realizzazione dei canali di alloggiamento delle suddette tubazioni di adduzione dell'ingestato e di allontanamento del digestato.

Figura 3.6 – Scavo della fossa

Figura 3.7 – Rimozione materiale pietroso dal fondo della fossa

3.4.3. Scavo di consolidamento del terreno di fondazione per le pareti della struttura portante del tetto

Terminate le operazioni di scavo della fossa, si procede con lo scavo di consolidamento del terreno di fondazione per le pareti della struttura portante del tetto. Il consolidamento ingloberà il terreno circostante la fossa, a partire da una distanza Δ di circa 10 cm dal bordo della medesima. La profondità dello scavo di consolidamento p_S sarà di circa 10 – 15 cm. La fondazione viene realizzata mediante uno strato di pietre (per esempio quelle rimosse dal terreno in fase di scavo della fossa) ricoperto da uno strato di terreno argilloso (*barro*).

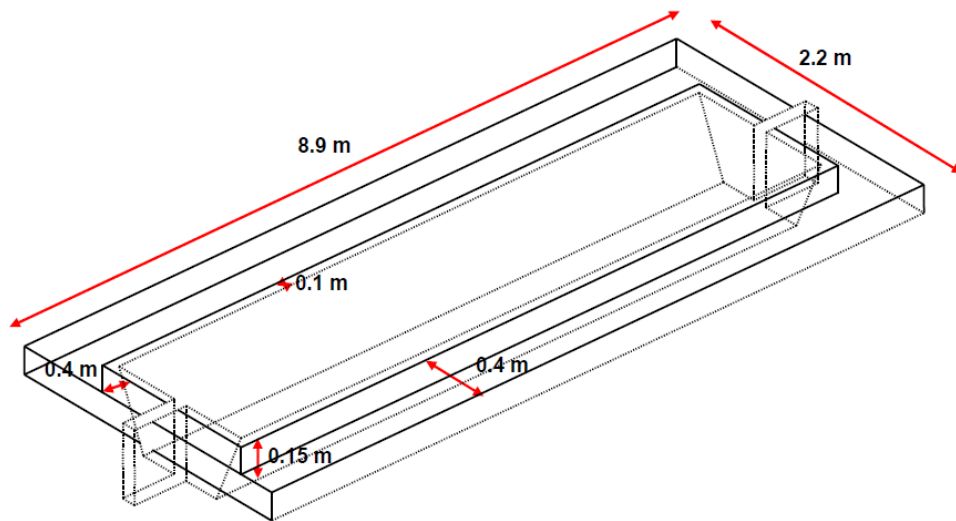



Figura 3.8 – Dimensioni della fossa e dello scavo di consolidamento del primo digestore installato

Figura 3.9 – Posizionamento del materiale di consolidamento

Figura 3.10 – Livellazione del terreno di fondazione

3.4.4. Elevazione delle pareti della struttura della serra

Le pareti, insieme alla copertura, andranno a costituire la struttura di una serra con lo scopo di conservare al suo interno una parte del calore trasmesso per irraggiamento dal Sole; in questo modo sarà possibile aumentare la temperatura all'interno del digestore favorendo le cinetiche dell'attività batterica, con evidenti risvolti positivi sul rendimento del processo. Le pareti avranno uno spessore s di 40 cm circa (vincolato alle dimensioni degli adobes, mattoni in terra cruda realizzati artigianalmente dal personale in loco: $40 \times 20 \times 15$).

Con riferimento a quanto prima accennato, riguardo l'orientamento del tetto, è possibile classificare il modello impiegato come una copertura ad un solo spiovente. La parete Nord

sarà dunque più bassa di quella Sud; la differenza di elevazione tra le due dipende dalla larghezza della fossa secondo la seguente relazione:

$$\tan^{-1}\left(\frac{b + 2\Delta}{h_{Sud} - h_{Nord}}\right) = 22°$$

Tale angolo di inclinazione consente di ricevere l'energia radiante in direzione ortogonale nelle ore più calde della giornata ed inoltre costituisce un modo sufficientemente efficace per scolare l'acqua piovana e la grandine, senza il rischio di perforazione della pellicola plastica costituente il tetto, a causa dell'urto con le gocce che precipitano.

Le pareti Est ed Ovest saranno erette in modo da unire le suddette pareti Nord e Sud.

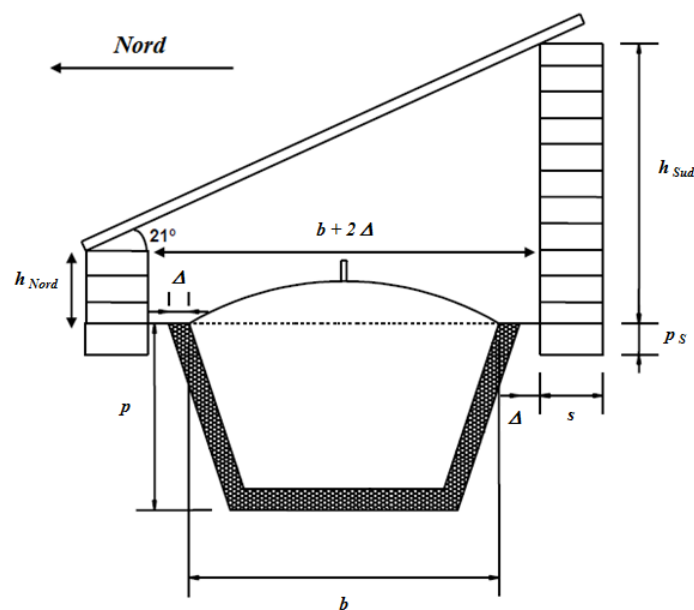



Figura 3.11 – Sezione della struttura a serra dell'impianto

Figura 3.12 – Elevazione delle pareti della serra

Figura 3.13 – Completamento delle operazioni di realizzazione della struttura portante della serra

3.4.5. Isolamento

Ultimata l’elevazione e la livellazione delle pareti si procede all’operazione di isolamento della parte interna della fossa. Il processo si svolge in due fasi successive:

- Posizionamento di teli in materiale plastico (come PE, polietilene) su tutta la superficie della base e delle pareti della fossa, fissate a queste ultime per mezzo di chiodi, preventivamente infilzati dentro un piccolo spessore in gomma per non causare la perforazione o più in generale il danneggiamento dei teli. La funzione dei suddetti teli è quella di proteggere dall’umidità lo strato isolante più interno.
- Posizionamento di uno strato di polistirene espanso dello spessore $\delta_{isol} = 10\ cm$, lungo tutta la superficie delle pareti interne, precedentemente ricoperte di telo in PE. Le buone caratteristiche del polistirene come isolante termico aiuteranno a mantenere il digestore in un rango di temperatura il più costante possibile (minimizzando le brusche oscillazioni termiche a cui è soggetta l’aria ambiente).

Figura 3.14 – Posizionamento strato isolante in LDPE

Figura 3.15 – Posizionamento strato isolante in PS

3.4.6. Gonfiaggio del digestore

Prima di collocare il digestore nella fossa viene riempito con aria al fine di individuare eventuali perdite, causate per esempio da danneggiamento in fase di trasporto, e per agevolarne la messa in posa senza incorrere nella formazione di pieghe, che potrebbero portare alla foratura durante il riempimento con acqua. L’aria viene fatta entrare attraverso la tubazione di alimentazione della miscela (sterco + acqua), mentre le restanti tubazioni vengono opportunamente sigillate. Per gonfiare il digestore si svolgono le seguenti fasi:

- Collocare il digestore al di sopra di un telo (per esempio la copertura in nylon a protezione del tetto) in modo da evitare il contatto con le asperità del suolo;
- Infilare l’estremità della tubazione di alimentazione della miscela ad un telo plastico tubolare. Quest’ultimo deve essere piegato ripetutamente lungo il lato a contatto con

la tubazione ed assicurato a quest'ultima con una corda annodata attorno alla tubazione stessa;

- Il gonfiaggio vero e proprio, avviene agitando tale telo tubolare mantenuto aperto in corrispondenza dell'estremità opposta alla tubazione, sfruttando le correnti di aria a favore: il principio è del tutto simile alla "manica a vento" (il procedimento funziona anche in assenza di vento, solo che è meno agevole);
- Una volta che il digestore sia gonfio, si procede con il taglio della manica a vento ad una distanza di circa 10 cm dall'estremo della tubazione e si annoda stretto.

Figura 3.16 – Telo impiegato per gonfiare il digestore

Figura 3.17 – Digestore in fase di gonfiaggio

3.4.7. Posizionamento del digestore nella fossa

Una volta gonfiato il digestore, si procede a collocarlo nella fossa. Date le ingombranti dimensioni è opportuno svolgere questa operazione in più persone, onde evitare urti e graffi. Uno degli operatori deve posizionarsi all'interno della fossa in modo da condurre le tubazioni di ingresso e uscita dentro gli opportuni canali scavati in precedenza.

Figura 3.18 – Operatori intenti a posizionare il digestore nella fossa

Figura 3.19 – Digestore posizionato nella fossa

3.4.8. Riempimento del digestore con acqua

Dopo aver alloggiato il digestore nella fossa si procede a riempirlo con un volume di acqua pari ad 1/3 del volume che in fase di progetto è stato calcolato verrà destinato al materiale in digestione.

3.4.9. Carica del digestore

Il volume pari ai 2/3 restanti dello spazio adibito al materiale in digestione, viene colmato con l'inserimento della miscela vera e propria, costituita da acqua con sterco (di maiale o di porcellino d'India). Dopodiché si inserisce il contenuto del rumine di uno o più bovini, circa 200 L, che funge da inoculo di biomassa metanigena, di cui è densamente popolato. In questo modo si riduce il tempo di acclimatazione della biomassa e avvio del processo.

Figura 3.20 – Fasi dell'operazione di carica del digestore

Una volta sistemato il digestore nella sede predisposta, si procede col fissare stabilmente le tubazioni di alimentazione e scarico; va tenuto presente che la fuoriuscita della frazione liquida del digestato avviene secondo il principio dei vasi comunicanti. Per tale ragione il livello del pelo libero del digestato deve essere inferiore di 50 – 60 cm rispetto al livello di ingresso dell'ingestato.

3.4.10. Installazione delle tubazioni di collettamento del biogas

La rete di tubazioni convoglia il biogas prodotto verso il gasometro e successivamente verso la cucina, dove sono installati i bruciatori. Nel tratto immediatamente successivo all'uscita del biogas dal digestore, i tubi sono posizionati con una pendenza di almeno l'1%, in modo tale da impedire al vapore che naturalmente condensa, per effetto del gradiente termico (tra l'interno e l'esterno della serra) di ritornare dentro il digestore stesso. Tipicamente la tubazione a cielo aperto viene agganciata alle pareti della serra tramite chiodi e fil di ferro che fungono da sostegno.

Figura 3.21 – Fasi dell'operazione di installazione delle tubazioni di collettamento del biogas

Il percorso seguito dai tubi parte dalla metà circa della parete longitudinale, in corrispondenza dello sfiato del biogas, già predisposto dall'azienda costruttrice, dove è anche installata una valvola di sicurezza. Termina nel lato più basso della parete trasversale più vicina all'edificio che ospita la cucina. Da questo punto, previo il passaggio attraverso la "trappola dell'acqua", ovvero un sistema di raccolta del vapore condensato, il tubo viene interrato fino a raggiungere la parete dell'edificio in cui verrà installato il gasometro.

3.4.11. Installazione della valvola di sicurezza

La valvola di sicurezza, installata in prossimità dello sfiato del biogas, ha lo scopo di controllare le sovrapressioni, le quali si generano laddove parte del gas prodotto durante il giorno non venga impiegato e rimanga all'interno del digestore, per la mancanza di spazio a disposizione nel gasometro. Il gas viene disperso in atmosfera laddove ecceda la pressione di progetto, generalmente compresa tra 2 e 10 cm di colonna d'acqua (nel nostro caso 6 cm e 5 cm rispettivamente per il primo e il secondo digestore).

La valvola di sicurezza è realizzata a partire da una bottiglia di plastica all'interno della quale viene introdotto un piccolo tubo diramatosi dal flusso principale per mezzo di una giunzione a 3 vie, e immerso in un volume di acqua il cui battente (rispetto all'estremità del tubo) corrisponde alla pressione di esercizio stabilita durante la progettazione.

Figura 3.22 – Valvola di sucurezza

Per poter controllare il livello dell'acqua nella bottiglia si è predisposta una apertura dalla quale, in caso di necessità, liquido e gas possano uscire.

3.4.12. Installazione della "trappola dell'acqua"

Il biogas che esce dal digestore contiene una frazione di vapore acqueo, il quale condensa a causa della variazione di temperatura tra l'interno della serra (in cui possono essere raggiunti i 70°C nello spazio compreso tra la cupola del digestore e il tetto della serra) e l'ambiente esterno. Onde evitare che le goccioline di vapore condensato ostruiscano il passaggio del biogas attraverso la tubazione, nel punto più basso dell'installazione (caratterizzata da un pendenza superiore all'1%) viene posizionata una "trappola per l'acqua" con la funzione di raccolta dell'umidità e successiva eliminazione mediante un rubinetto manuale, senza che si generino perdite di biogas. Per facilitare le operazioni di manutenzione si è optato per il posizionamento della valvola all'interno di un secchio di materiale plastico dotato di coperchio: specialmente nella stagione delle piogge si incorrerebbe, altrimenti, nel rischio di ostruzione del pozzetto con terra e fango.

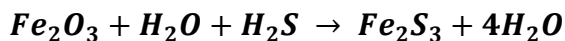
Figura 3.23 – Trappola dell’acqua

Figura 3.24 – Installazione della trappola dell’acqua

3.4.13. Installazione del filtro per la rimozione dell’idrogeno solforato

L’idrogeno solforato H_2S, componente in tracce del biogas, riconoscibile per il suo caratteristico pungente odore di “uova marce”, è un precursore dell’acido solforico H_2SO_4, che viene prodotto a seguito di combustione con ossigeno O_2 all’interno di motogeneratori o bruciatori di cucine, entrambi presenti nella configurazione di impianto di Vilcabamba.

Le ben note proprietà corrosive dell’acido solforico ne fanno una minaccia per le parti metalliche e meccaniche delle apparecchiature installate. È pertanto necessario sequestrare dal biogas la frazione, seppur esigua di idrogeno solforato. Si è optato per l’adozione di un filtro costituito da una lamina di ossido di ferro (del tutto simile alle “pagliette” scrostanti utilizzate in cucina); la lamina di ferro viene fatta ossidare naturalmente bagnandola con un po’ d’acqua e lasciandola qualche ora esposta alla radiazione solare. La reazione chimica alla base del processo di rimozione è la seguente (considerando una inevitabile presenza residua di umidità):

$$\boldsymbol{Fe_2O_3 + H_2O + H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 4H_2O}$$

E successivamente si procede all’operazione di rigenerazione dell’ossido ferrico:

$$\boldsymbol{2Fe_2S_3 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe_2O_3 + 2H_2O + 6S}$$

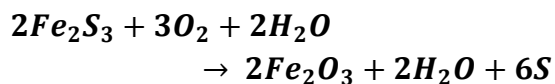



Figura 3.25 – Paglietta di ferro

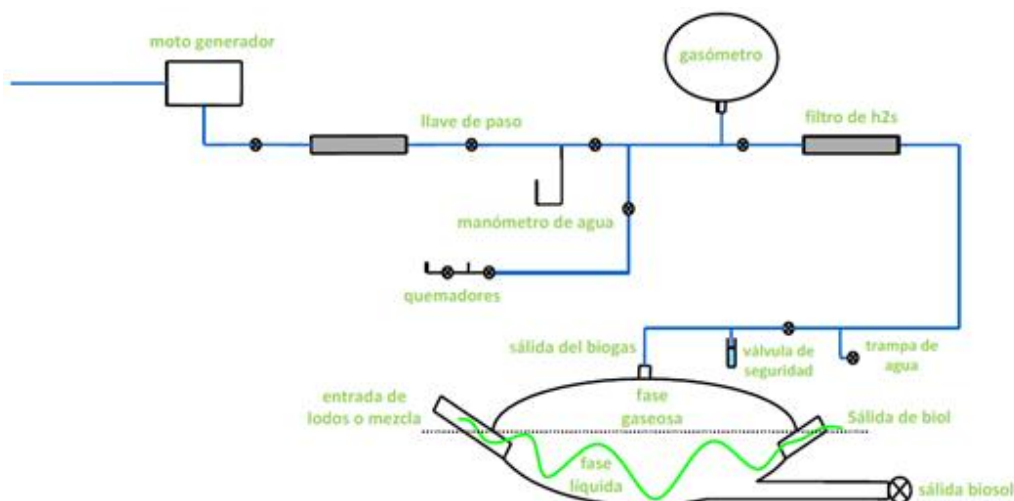



Figura 3.26 – Schema dell'impianto di tubazioni di adduzione del biogas

3.4.14. Costruzione del tetto della serra

Il tetto della struttura a serra ha una doppia funzione: da un lato funge da protezione per il digestore nei confronti di agenti atmosferici e dai volatili e animali da compagnia (non stabulati) che vivono all'interno della fattori; dall'altro contribuisce al miglioramento dell'isolamento termico, favorendo la conservazione di un range di temperatura adeguato allo svolgimento delle fasi del processo biologico (e quindi alle cinetiche dell'attività batterica). La portanza del tetto è data da una intelaiatura realizzata con legno di eucalipto, molto abbondante sul territorio. L'isolamento è garantito da uno strato di polietilene dello spessore di circa 250 micron, con il quale sono rivestiti i listoni. Onde evitare la lacerazione della pellicola plastica a seguito della inchiodatura su legno, si interpone un sottile strato in gomma, tra il chiodo e l'*agrofilm*.

Figura 3.27 – Struttura del tetto

Figura 3.28 – Posizionamento agrofilm

3.4.15. Installazione del gasometro

Il gasometro serve come ulteriore volume di stoccaggio, oltre allo spazio già presente all'interno del digestore (25% del volume totale). Viene posizionato in un luogo fresco e riparato dal Sole, dagli agenti atmosferici e dagli animali in grado di danneggiarlo. Oltre ad immagazzinarlo, il gasometro consente di incrementare la debole pressione del biogas in uscita dal digestore. Il gasometro è installato in posizione verticale e sopra di esso è predisposta una carrucola che, qualora fosse necessario, cala un peso ricreando un movimento "tipo pistone" per comprimere il biogas stoccato, permettendogli di raggiungere agevolmente i bruciatori della cucina. Quest'ultima è ubicata non lontano dal gasometro. Nel nostro caso si trattava di due vani separati, ma con una parete in comune, opportunamente forata per consentire il passaggio della tubazione di mandata.

Figura 3.29 - Gasometro

Figura 3.30 – Sistema di compressione a carrucola

3.4.16. Installazione del contatore del gas, del manometro e dei bruciatori

Inizialmente il progetto prevedeva l'installazione del contatore a monte del gasometro; tuttavia ci si rese conto che il biogas in uscita dal digestore aveva una pressione insufficiente per mettere in funzione l'apparecchio. Si è pertanto optato per collocare il contatore a valle del gasometro e per comodità si è deciso di porlo in cucina. Accanto ad esso è stato posizionato un manometro: così facendo, la sposa del fattore, incaricata di cucinare i pasti, poteva comodamente controllare il corretto funzionamento dell'impianto, verificando che il biogas fosse addotto alla pressione di progetto e che il contatore registrasse opportunamente il flusso. La tubazione infine è stata connessa ad un piano cottura dotato di due fornelli.

Figura 3.31 - Manometro

Figura 3.32 – Contatore del gas

Figura 3.33 – Bruciatori adattati al funzionamento con biogas

Figura 3.34 – Piano cottura allestito ed in funzione

3.4.17. Realizzazione dei pozzetti di carico e scarico

Per agevolare le operazioni di miscelazione ed omogeneizzazione della miscela, nonché la fase di carico del digestore, da un lato, e la raccolta della frazione liquida del digestato dall'altro, sono state costruiti due pozzetti impermeabili in cemento, dimensionati in funzione delle volumetrie di materiale alimentato e digerito quotidianamente. I pozzetti sono costruiti in modo tale che le tubazioni di carico e scarico risultino poi al centro dei medesimi.

Figura 3.35 – Costruzione del pozzetto di raccolta del biol

Figura 3.36 – Pozzetto terminato

3.4.18. Realizzazione di un dispositivo per l'agitazione

Anche se non Figura in letteratura come una fase necessaria nel caso si adotti un sistema di tipo "flusso a pistone", si è ritenuto opportuno dotare il digestore di un semplice dispositivo di agitazione manuale del materiale contenuto al suo interno. I benefici che se ne traggono sono elencati di seguito:

- Destabilizzazione della *crosta* che si crea in prossimità del pelo libero della fase liquida, dove il materiale in sospensione coagula e costituisce una barriera per le bolle di biogas prodotte che rimangono intrappolate nello strato sottostante;
- Aumento delle possibilità di contatto tra la biomassa attiva ed il substrato;
- Riduzione del tempo di ritenzione idraulica.

La sua costruzione è semplice e prevede l'impiego di un tubo di PVC, del tutto simile a quelli utilizzati per il trasporto del biogas, al quale sono fissati dei dischetti di gomma, responsabili della turbolenza indotta.

Figura 3.37 – Dettaglio del dispositivo di agitazione

3.5. Presentazione del piano di monitoraggio

Per raccogliere informazioni di maggior dettaglio è stato ritenuto opportuno intensificare le attività di monitoraggio al fine di migliorare la comprensione del processo di digestione anaerobica e misurare i parametri più importanti. Il progetto sarà sviluppato nella fattoria Alfacancha proprietà di Caritas – Chuquibambilla, che si trova nel distretto di Vilcabamba - provincia di Grau - regione di Apurimac. Questa attività fa parte del progetto MAE: AIUTO 9550/APURIMAC/PERU': *"Energie rinnovabili da bio-digestori in Apurimac"*.

3.5.1. Informazioni di ordine organizzativo

Periodo di monitoraggio: 6 mesi dal giorno 25 febbraio 2013 fino al giorno 25 agosto 2013. Questo periodo è consigliabile perché rappresenta una lunghezza pari a 3 volte il tempo di ritenzione idraulica dei due digestori (HRT).

$$\boldsymbol{HRT = \frac{volume\ utile}{alimentazione\ giornaliera}}$$

$$\boldsymbol{HRT_1 = \frac{10000L\ \cdot\ 75\%}{120\,\frac{L}{giorno}} \cong 62\ giorni} \qquad \boldsymbol{HRT_2 = \frac{6700L\ \cdot\ 75\%}{84\,\frac{L}{giorno}} \cong 59\ giorni}$$

Strumentazione (vedere Allegato A1 con i dettagli dei singoli strumenti):

STRUMENTO	*PARAMETRO MISURATO*	*MODALITÀ*
Sensori di temperatura(*)	Temperatura	continuo
Data logger(*)	Memorizzatore di dati	continuo
pH-metro	pH	discontinuo
Asta graduata	Volume di biol prodotto ogni giorno	discontinuo
Contatore del gas	Volume di biogas prodotto/consumato	discontinuo

3.5.2. Attività di monitoraggio in campo

Il progetto è già in possesso dei dati di temperatura relativi ai primi 3 mesi di funzionamento del primo digestore; i dati sono stati raccolti dall'Ing. Vladimir Morales Romero per mezzo della sua personale strumentazione, che consiste di 4 sensori di temperatura e 2 data logger. Questa apparecchiatura è installata dal giorno 18 dicembre 2012 nel secondo digestore e rimarrà lì per tutta la durata del monitoraggio.

(*)Per tale ragione si è reso necessario acquisire le stesse apparecchiature (4 sensori di temperatura e 2 data logger) per il monitoraggio del primo digestore e continuare la valutazione di entrambi i digestori sul lungo periodo, come si prefigge il progetto.

Il processo di monitoraggio consiste di:

1. Misurazione della temperatura in continuo per l'intero periodo di monitoraggio, con i 4 sensori già installati nel secondo digestore, ed i 4 che verranno acquistati ed installati nel primo.

Disposizione dei sensori nel secondo biodigestore:

- Un sensore che misura la temperatura ambientale;
- Un sensore che misura la temperatura dell'aria all'interno della serra;
- Un sensore che misura la temperatura all'interno del digestore nella parte inferiore del volume liquido;
- Un sensore che misura la temperatura all'interno del digestore nella parte superiore del volume liquido.

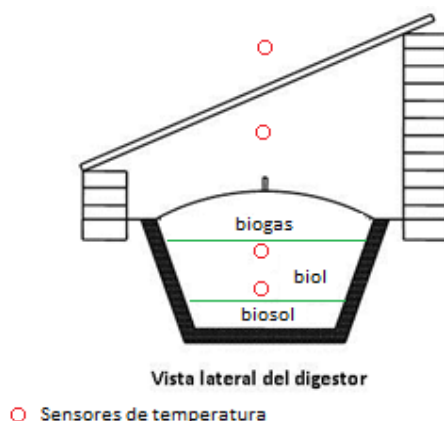



Figura 3.38 – Disposizione dei sensori di temperatura nell'impianto

Sarà mantenuta la stessa distribuzione di sensori per entrambi i digestori.

2. Annotare la produzione giornaliera di biogas di entrambi i digestori attraverso la lettura dei contatori. Del primo digestore si sta misurando il consumo attraverso un contatore installato nella cucina; questo apparecchio misura anche parte del biogas che fuoriesce dal secondo digestore. Il contatore avrebbe dovuto essere installato a monte del gasometro; tuttavia, il biogas in uscita dal digestore non ha una pressione sufficiente per attivare lo strumento. Per questa ragione la produzione di biogas si misura in maniera indiretta, misurando in realtà il consumo per cucinare i pasti, nella ipotesi che tutto il gas prodotto venga adoperato in cucina. Del secondo digestore è misurata anche la quantità di gas prodotta mediante un altro contatore installato nel vano che ospita i gasometri. Parte del biogas prodotto dal secondo digestore verrà, a regime, utilizzato per la produzione di energia elettrica; per questo sarà possibile valutare la sola produzione del primo digestore tramite la seguente relazione:

$$Produzione_{1°} = Consumo_{(1°+2°)} - Produzione_{2°} - Consumo_{generatore\ elettrico}$$

Al termine della cena si dovranno svuotare completamente i gasometri e solo dopo tale operazione sarà possibile effettuare una lettura dei contatori che sia effettivamente rappresentativa del consumo giornaliero.

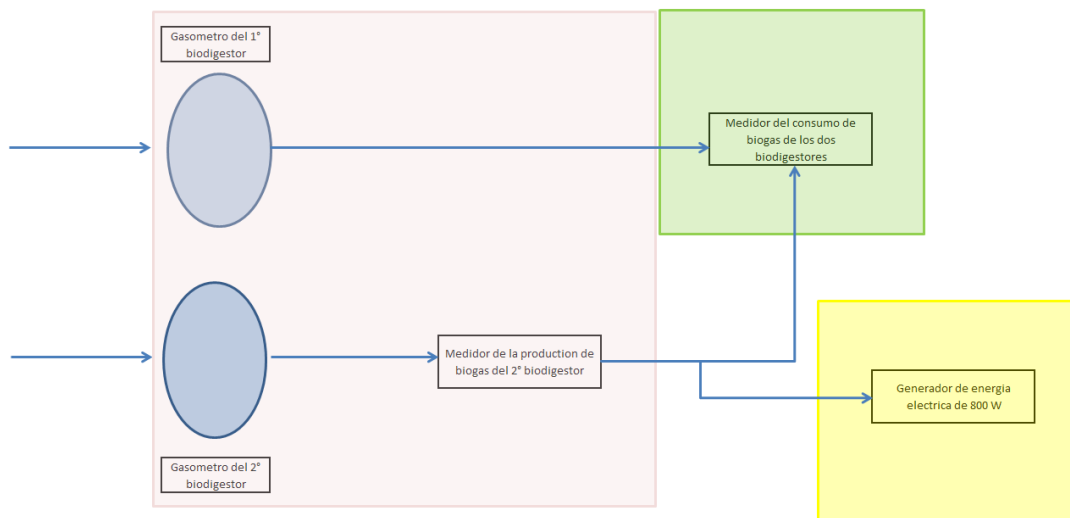



Figura 3.39 – Schema del sistema di tubazioni di convogliamento del biogas per entrambi i digestori

3. Misurazione del pH per verificare il corretto funzionamento del processo di digestione anaerobica. Si dispone che venga misurato settimanalmente il pH dell'ingestato (miscela di sterco con acqua) e della frazione liquida del digestato di entrambi i digestori. Il pH della miscela deve essere misurato giusto prima di alimentarla; il pH del biol sarebbe opportuno misurarlo dopo aver caricato la miscela ed essere sicuri che il biol fresco sia uscito da ambo i digestori: questo potrebbe avvenire all'incirca per le 12.30 quando la temperatura e l'attività batterica raggiongono il loro apice.

4. Oltre al pH è necessario misurare il volume di biol prodotto, ponendo un'asta graduata all'interno dei pozzetti di raccolta di ciascun digestore, affinché, note le sezioni geometriche rispettive, sia possibile il calcolo della volumetria. Per consentire tale operazione, anch'essa con cadenza settimanale, bisognerà svuotare totalmente i pozzeti di raccolta e stoccare il materiale liquido in appositi cilindri. La misura del volume di biol prodotto avverrà contestualmente alla misura del pH del medesimo. In realtà, sarebbe più corretto misurare la produzione di biol ad una ora più tarda, affinché si abbia la ragionevole certezza che tutto il biol prodotto sia già uscito dal digestore. Per facilitare lo svolgimento delle attività in campo, assegnate ad un personale non tecnico e dedito ad altre mansioni al di fuori del piano di monitoraggio, si è optato per svolgere la misura intorno alle 12.30, sapendo che, comunque, la maggior parte del biol

fuoriesce prima di tale orario. A favore di precisione e a scanso di approssimazioni, per un ristretto numero di giorni si potrebbe misurare la frazione di digestato liquido che fuoriesce dopo l'effettuazione della misura, così da poter aggiungere un contributo percentuale (X%) di biol che seppur prodotto nell'arco della giornata, sfugge alla misura. Dati i quantitativi teorici di produzione del digestato liquido di ciascun digestore, risulta evidente come, disponendo di 3 soli cilindri metallici del volume di 200 L cada uno, serva munirsi di altro volume di stoccaggio. Nell'ottica a lungo termine di poter impiegare il biol come fertilizzante fogliare (per la fertirrigazione) – quindi con l'idea di conservare le sue proprietà – si ipotizza un periodo di stoccaggio massimo di una settimana. Conseguentemente, come si evince dai calcoli sotto riportati, si rende necessario l'acquisto di 4 contenitori ulteriori.

$$Produzione\ teorica\ di\ \ biol_{\ 1^\circ} = 120\ \frac{L}{giorno}$$

$$Produzione\ teorica\ di\ biol_{\ 2^\circ} = 84\ \frac{L}{giorno}$$

$$Volume\ utile\ di\ ogni\ cilindro = 200\ L \qquad\qquad Tempo\ di\ stoccaggio = 7\ giorni$$

$$Volume\ di\ \ biol_{\ 1^\circ}\ prodotto\ in\ 7\ giorni = 120\ \frac{L}{giorno} \cdot 7\ giorni = 840\ L \approx 4\ cilindri$$

$$Volume\ di\ \ biol_{\ 2^\circ}\ prodotto\ in\ 7\ giorni = 84\ \frac{L}{giorno} \cdot 7\ giorni = 588\ L \approx 3\ cilindri$$

Chiaramente le frazioni liquide del digestato raccolte da ciascun digestore, vanno tenute separate.

5. Misurazione del potere calorifico del biogas prodotto. Per la determinazione di questo parametro si porteranno ad ebollizione 2 litri di acqua in un recipiente, impiegando rispettivamente il biogas prodotto da ciascun digestore. Si misurerà la temperatura dell'acqua prima e dopo ebollizione (e quindi l'incremento ΔT misurato in gradi Kelvin), così sarà possibile calcolare il calore assorbito dal liquido. Contestualmente verrà misurato, tramite il contatore, il volume di biogas consumato. Il potere calorifico espresso in MJ/m^3 sarà calcolato mediante le seguenti relazioni:

$$\boldsymbol{PCI = \frac{energia\ termica\ liberata\ [MJ]}{volume\ di\ biogas\ utilizzato [m^3]} = \frac{Q}{V_{biogas}} = \frac{m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T}{V_{biogas}}}$$

Dove m_{H_2O} è la massa d'acqua portata ad ebollizione espressa in kg, c_{H_2O} il calore specifico della medesima espresso in $\frac{MJ}{kg \cdot K}$.

4. *Analisi termica dell'impianto semplificato di digestione anaerobica*

4.1. *Introduzione alla teoria della trasmissione del calore*

In termodinamica sono definite due particolari forme di energia: il lavoro e il calore. Esse non sono funzioni di stato, ossia non sono caratteristiche dello stato del sistema, ma esistono solo quando il sistema è sede di uno scambio di energia (con altri sistemi, oppure al suo interno, o con l'ambiente circostante). Quando lo scambio di energia avviene in virtù di una differenza di temperatura si parla di trasmissione di calore; in tal caso, i Principi della termodinamica ci permettono di affermare in primo luogo che il calore ceduto da un sistema deve essere uguale al calore ricevuto dall'altro (conservazione dell'energia) e che il calore viene trasferito spontaneamente dal sistema a temperatura maggiore a quello a temperatura minore. Per citare un esempio, basti pensare a due corpi aventi temperature diverse che vengono posti a diretto contatto. Dopo un certo intervallo di tempo, essi raggiungono la medesima temperatura finale, compresa fra le due temperature a cui si trovavano inizialmente. La termodinamica tuttavia non ci dà nessuna ulteriore informazione: in particolare non spiega le modalità con cui tale scambio avviene, né determina il tempo necessario per lo scambio stesso. Tali problemi sono l'oggetto di una disciplina tecnica detta Trasmissione del Calore. Lo scopo della trasmissione del calore è descrivere quantitativamente le modalità con cui la differenza di temperatura tra due corpi regola lo scambio di calore tra di essi. Queste conoscenze sono indispensabili per determinare il tempo in cui si compiono le trasformazioni termodinamiche: infatti in termodinamica lo scambio di calore e di lavoro dipende solo dalle trasformazioni del sistema e non dal tempo in cui il sistema evolve: a parità di trasformazioni, il calore ed il lavoro scambiati sono gli stessi sia che la evoluzione del sistema avvenga in un millisecondo che in un milione di anni. Le conoscenze di trasmissione del calore sono anche indispensabili per risolvere altri problemi tecnici, ad esempio: controllo di temperatura in impianti industriali, isolamento termico di macchinari ed edifici, raffreddamento efficiente delle macchine. Una parte importante della trasmissione del calore riguarda lo studio dello scambio termico nella persona umana e delle condizioni ambientali per le quali l'uomo si trova in stato di benessere.

4.2. *Modalità di trasmissione del calore*

I processi di scambio termico sono generalmente classificati in tre categorie, anche se in pratica non si presenta mai una sola modalità, ma solitamente si ha la combinazione di almeno due di esse. Si tende però di solito ad individuare il tipo di scambio predominante, trascurando, a seconda di vari fattori (dei quali sicuramente molto rilevante è la temperatura), le altre modalità di trasmissione del calore presenti. Le suddette tre categorie sono: conduzione, convezione e irraggiamento.

4.2.1. Conduzione

La conduzione termica è il processo che si attua in un mezzo solido, liquido o aeriforme nel momento in cui, a causa di una differenza di temperatura, viene provocato un trasferimento di energia cinetica da una molecola a quella adiacente che possiede una velocità di vibrazione minore, essendo la velocità di vibrazione delle particelle indice della temperatura del corpo. Si ha in questo modo un trasferimento di energia, sotto l'influenza del gradiente di temperatura (variazione della temperatura lungo una direzione), senza uno spostamento di particelle; dunque il mezzo in cui avviene conduzione rimane nella condizione di quiete. La conduzione è originata dall'attività molecolare e atomica; infatti può essere vista come un trasferimento di energia dalla particella di materia più energetica a quella meno energetica, attraverso interazioni tra le particelle stesse. Il meccanismo fisico della conduzione è spiegabile considerando un gas, in cui è presente un gradiente di temperatura e dove si ipotizza l'assenza di moti macroscopici. Il gas occuperà lo spazio tra le due superfici mantenute a differente temperatura. Ad ogni punto si associa la temperatura con l'energia delle molecole del gas in prossimità del punto. Questa energia è riferita al moto casuale di traslazione, nonché a quelli di rotazione e di vibrazione delle molecole. La temperatura alta è associata all'alta energia delle molecole: quando queste molecole ad alta energia entrano in collisione con quelle contigue, si ha un trasferimento di energia dalle molecole più energetiche a quelle meno. In presenza di un gradiente, lo scambio avverrà in direzione della diminuzione di temperatura. Questo discorso può essere esteso ai liquidi e ai solidi, dove la collisione delle molecole è più frequente in quanto avviene in uno spazio ancor più ridotto.

4.2.2. Convezione

La convezione è un tipo di trasporto (di materia ed energia), assente nei solidi e trascurabile per i fluidi molto viscosi, causato da un gradiente di pressione e dalla forza di gravità e caratterizzato da moti di circolazione interni al fluido. Il moto convettivo risultante è uno stato di moto caratterizzato da un alto grado di miscelazione, che dipende dal regime idrodinamico: in particolare, in regime laminare il grado di miscelazione è più basso, mentre in regime turbolento il grado di miscelazione è maggiore, e di conseguenza i coefficienti di scambio sono più elevati. Un fluido, a contatto con un corpo la cui temperatura è maggiore di quella dell'ambiente che lo circonda, si riscalda e, per l'aumento di temperatura subito, si espande (nella maggior parte dei casi). A causa della spinta di Archimede, questo fluido sale, essendo meno denso del fluido circostante che è più freddo. Contemporaneamente, il fluido più freddo scende e prende il posto di quello più caldo che sale; in questo modo si instaura una circolazione convettiva.

Per esempio supponendo di avere un sistema isolato dall'esterno costituito da due corpi aventi temperature differenti, l'uno al di sopra dell'altro, divisi da uno strato di acqua, che, come vedremo, svolgerà la funzione del sopraccitato fluido.

Supponendo che venga posto in superficie il corpo più freddo, siccome l'acqua calda tende a salire e l'acqua fredda a scendere (per la diversa densità), si sviluppa un moto convettivo per cui nella zona centrale l'acqua riscaldatasi a contatto con il corpo caldo sale verso il corpo freddo, mentre nelle zone più esterne si ha una movimento verso il basso dell'acqua che, raffreddatasi per il contatto con il corpo freddo, si dirige verso quello caldo. Si può osservare che si avrebbe una situazione molto diversa nel caso in cui i due corpi venissero invertiti, ossia se il corpo a temperatura maggiore fosse posto in superficie ed il corpo a temperatura minore sotto lo strato d'acqua: in questo caso non si avrebbe nessun moto convettivo, ma l'acqua rimarrebbe ferma trasferendo calore dal corpo più caldo a quello più freddo solo per conduzione. Si è fino ad ora descritta la convezione libera o naturale. La convezione può anche essere forzata, vale a dire che in alcuni casi, per scopi pratici, il moto del fluido può essere obbligato da ventole o pompe o semplicemente dall'effetto di correnti ventose. È il trasferimento di energia tra una superficie solida ed un fluido adiacente in movimento rispetto ad essa: effetto combinato di conduzione termica e trasporto di massa. In assenza di trasporto di massa la trasmissione di calore avviene solo per conduzione: la conduzione può essere vista come caso limite della convezione, quando il fluido è in quiete.

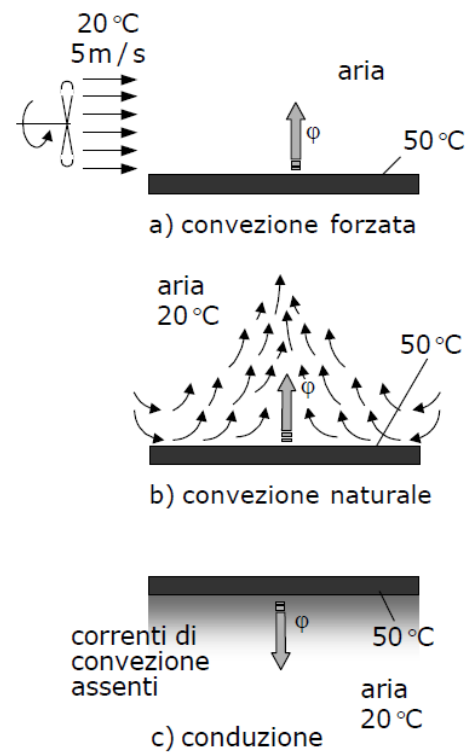



Figura 4.1 – Diverse forme di convezione

Tabella 4.1 – Valori tipici del coeficiente di scambio termico convettivo

Tipo di fenomeno convettivo	***h_c (W/m^2*K)***
Convezione naturale nei gas	2 – 25
Convezione naturale nei liquidi	10 – 1000
Convezione forzata nei	25 – 250
Convezione forzata nei liquidi	50 – 20000
Ebollizione e condensazione	2500 – 100000

4.2.3. Irraggiamento

Irraggiamento o radiazione termica è il termine usato per indicare la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie di un corpo che si trova ad una certa temperatura. Tutti gli oggetti emettono radiazioni elettromagnetiche, che sono frutto dell'eccitazione termica della superficie del corpo, legata alla condizione energetica dei suoi atomi (l'irraggiamento è tanto più intenso quanto maggiore è la temperatura dell'oggetto stesso), e viene emessa in tutte le direzioni; quando il mezzo trasmissivo risulta essere sufficientemente trasparente a tale radiazione, nel momento in cui essa colpisce un altro corpo, parte viene riflessa e parte assorbita. Tra i due corpi si stabilirà un continuo scambio di energia, con uno scambio netto di calore dal corpo più caldo al corpo più freddo. Da notare è che può anche non esservi un mezzo di trasmissione, in quanto l'irraggiamento è l'unica modalità di scambio termico che avviene anche nel vuoto. Basti pensare alla radiazione solare, esempio più evidente di tale trasmissione. Si ha sia emissione che assorbimento di radiazione elettromagnetica. È un fenomeno che si presenta ad ogni temperatura, ma solo a temperature abbastanza elevate il contributo allo scambio termico per irraggiamento supera i contributi per conduzione e convezione. La quantità di calore emessa da un corpo per irraggiamento è infatti proporzionale a T^4, cioè alla quarta potenza della sua temperatura assoluta (espressa in Kelvin): perciò a basse temperature l'irraggiamento è responsabile di una frazione trascurabile del flusso di calore rispetto alla convezione e alla conduzione, ma al crescere della temperatura la sua importanza aumenta rapidamente fino a diventare il principale artefice della trasmissione del calore per temperature medio-alte.

Fisicamente l'irraggiamento consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e molecole eccitati dall'agitazione termica, che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura: per esempio i corpi a temperatura ambiente emettono in prevalenza fotoni nella lunghezza degli infrarossi, che per questo sono anche detti raggi termici; corpi molto freddi irradiano microonde (quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio), mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa (temperatura del cosiddetto calor rosso, circa 700 °C) poi sempre più bianca (temperatura del calor bianco, circa 1200 °C): man mano che la temperatura aumenta, la frequenza della luce emessa aumenta fino al bianco-azzurrino, per poi passare ai raggi ultravioletti, e ai raggi X nel caso di plasmi stellari a temperature dell'ordine di milioni di gradi. Il calore scambiato per irraggiamento si trasmette prevalentemente dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore; in realtà, l'energia si propaga in entrambe le direzioni, ma con minore intensità da quello freddo a quello caldo. Infatti, se un corpo emanasse soltanto e non assorbisse mai energia elettromagnetica, la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto. L'emissione e l'assorbimento dipendono dalla frequenza della radiazione, dalla natura del corpo e da alcune caratteristiche della sua superficie.

4.3. Implementazione del modello di scambio termico

Come prima cosa è stato necessario definire le parti che compongono il sistema. Per tutti gli scenari sono presenti:

- La parete Sud (S), di forma rettangolare e più alta rispetto alle altre;
- La parete Nord (N), sempre di forma rettangolare;
- La parete Est (E) e la parete Ovest (O) equivalenti tra loro e di forma trapezoidale;
- La copertura (C) in agrofilm (materiale usato per le coperture delle serre);
- La geomebrana (G), intesa come la cupola del reattore tubolare che emerge dalla fossa di alloggiamento, ed è quindi esposta alla radiazione solare ed agli scambi termici con le altre parti del sistema interne alla serra;
- Il volume di aria interna alla serra (V);
- La coperta di nylon (NY) utilizzata solamente in alcune ore del giorno, per limitare le perdite di calore dall’interno della serra verso l’ambiente esterno.

Per convenzione di terminologia, il riferimento alle pareti della serra dipende dal punto cardinale verso cui è rivolta la parte esterna delle medesime. Infatti ciascuna parete avrà comunque anche un lato esposto verso il punto cardinale opposto, il quale, anch’esso, riceverà una quota parte di radiazione solare, come successivamente verrà dettagliato.

Per quanto riguarda gli scenari alternativi saranno ovviamente presenti le rispettive parti di sistema opportunamente introdotte, ovvero, i tubi in PVC per il pre-riscaldo della miscela (T) all’interno della serra, o i serbatoi/reattori di pre-fermentazione (SER) sulla parete Sud.

In tutti i casi il sistema globale si completa con un sotto-sistema costituito dal contenuto del reattore:

- Il materiale in digestione (SL), a cui si aggiunge la quota parte di ingestato (ING) alimentato diariamente ad un orario opportuno a seconda dello scenario;
- Il biogas (B) prodotto durante le reazioni e contenuto all’interno della cupola gasometrica del reattore;
- La geomebrana (G);

Il sistema così descritto è in contatto, seppur con un sistema di isolamento termico, con l’ambiente, costituito per semplicità da:

- Il suolo (SU) circostante la fossa;
- L’aria ambiente (A).

In particolare i fenomeni di scambio termico che sono stati presi in considerazione sono i seguenti:

- Radiazione solare incidente sulle superfici esterne;
- Radiazione solare incidente sulle superfici interne alla serra;
- Trasferimento di calore per irraggiamento tra le diverse superfici interne alla serra;
- Trasferimento di calore per irraggiamento tra le superfici esterne e l'ambiente;
- Trasferimento di calore convettivo tra le superfici interne alla serra e l'aria interna alla serra;
- Trasferimento di calore convettivo tra le superfici esterne e l'ambiente;
- Trasferimento di calore convettivo tra la cupola della geomembrana e il biogas in essa contenuto;
- Trasferimento di calore conduttivo tra il suolo circostante la fossa di alloggiamento e lo slurry contenuto nel reattore tubolare;
- Energia termica apportata nello slurry dall'ingestato al momento di caricare il reattore;
- Energia termica che viene sottratta al sistema sottoforma di biogas prodotto.

Queste componenti sono presenti nella formulazione del modello termico per tutti gli scenari. Per gli scenari alternativi invece verranno specificate in seguito le altre componenti. Di seguito verranno dettagliate tutte le coponenti di scambio termico tra le diverse parti del sistema e tra sistema e ambiente.

Il modello che è stato implementato è un modello unidimensionale a parametri concentrati. Studiando la trasmissione del calore, si osserva che alcuni corpi si comportano come un insieme concentrato di temperatura interna essenzialmente uniforme in ogni istante durante il processo di scambio termico e funzione del tempo soltanto, *T(t)*. Lo studio della trasmissione del calore basato su questa idealizzazione, si dice studio di un sistema a parametri concentrati. L'osservazione dei risultati ottenuti, sufficientemente aderenti alla realtà del fenomeno, non giustificano comoplessità maggiori per il modello. Si consideri un corpo di forma arbitraria di massa m, volume V, area superficiale A, densità ρ, e calore specifico c_p, inizialmente con temperatura uniforme T_i , posto all'istante t = 0 in un ambiente a temperatura T_∞ . Se $T_\infty > T_i$ si avrà trasmissione di calore dall'ambiente al corpo con un coefficiente di scambio termico h, al contrario per $T_\infty < T_i$. L'ipotesi che la temperatura di tutta la massa m sia uniforme ci consente di scrivere un'equazione nella quale possiamo imputare al calore che entra (o esce) nell'unità di tempo attraverso l'involucro del corpo con la corrispondente variazione di temperatura, trascurando di fatto la distribuzione di temperatura entro il corpo stesso (in altre parole ipotizzando una conducibilità infinitamente grande).

4.4. Calcolo dei percorsi solari e degli angoli di incedenza sulle superfici del sistema

Il sistema riceve la quasi totalità dell'energia termica entrante (escludendo l'energia dell'ingestato alimentato) dalla radiazione solare incidente sulle sue diverse parti, sia esternamente che internamente.

Il calcolo della radiazione solare richiede un preventivo studio dei percorsi solari, in modo tale che sia possibile determinare l'angolo con cui i raggi del Sole incidono sulle superfici del sistema.

A causa della rotazione terrestre, il Sole descrive durante la giornata un arco parabolico funzione dell'angolo di altezza rispetto al piano orizzontale e dell'angolo azimutale.

Essendo note le coordinate geografiche del sito di Vilcabamba e le giaciture delle singole parti del sistema è stato possibile calcolare l'angolo di incidenza dei raggi solari su ciascuna di esse in funzione dell'ora del giorno.

Tabella 4.2 – Caratteristiche del sito di Vilcabamba, Grau, Apurimac, Perù

Latitudine (°)	*Longitudine (°)*	*Quota (m slm)*	*Pressione atmosferica (atm)*	*Umidità relativa dell'aria (%)*
ϕ	λ	z	p	u
-13.70806	-72.39000	2800	0.7071	65

Dove la pressione atmosferica è stata calcolata con la seguente formula:

$$\boldsymbol{p = 0.9877^{\frac{z}{100}}}$$

in cui z rappresenta la quota sul livello del mare (misurata in metri).

L'umidità dell'aria è stata posta inizialmente pari al 65%: in mancanza di dati sito-specifici, sono stati utilizzati i dati della stazione meteorologica di Chuquibambilla, capuologo della provincia di Grau. Pressione ed umidità saranno necessarie per il calcolo di ulteriori parametri come di seguito verrà esposto.

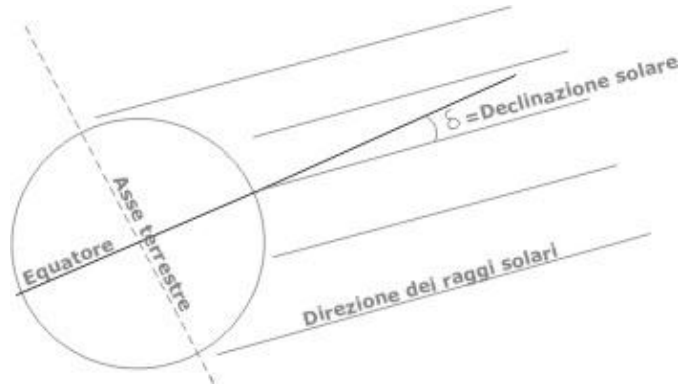
Tabella 4.3 – Caratteristiche delle parti costituenti il sistema

			C	***S***	***N***	***E***	***O***	***G***	***NY***
Esposizione	*[°]*	Ψ	0.00	180.00	0.00	90.00	-90.00	0.00	0.00
Inclinazione	*[°]*	α	22.20	90.00	90.00	90.00	90.00	0.00	22.20
Area	*[m²]*	A	16.64	9.03	2.75	1.47	1.47	11.12	16.64
Coefficiente di assorbimento sul lato esterno	/	α_λ	0.20	0.80	0.80	0.80	0.80	0.00	0.60
Coefficiente di assorbimento sul lato interno	/	α_λ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
Coefficiente di trasmissione	/	τ_λ	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

In cui α_i rappresenta l'angolo di inclinazione della superficie i-esima rispetto al piano orizzontale. Per quanto riguarda l'inclinazione della copertura della serra, si rimanda al calcolo effettuato al capitolo precedente, in cui si descrivevano le fasi di progettazione dell'impianto.

Come anticipato, la posizione del Sole nell'arco che descrive nel cielo, dipende dal giorno dell'anno e dall'ora rispettivamente tramite i seguenti parametri astronomici.

4.4.1. L'angolo di declinazione solare δ

E' l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale; risulta anche pari all'angolo che i raggi solari formano a mezzogiorno con la direzione dello zenit sull'equatore e coincide inoltre con la latitudine geografica alla quale in un determinato giorno dell'anno il Sole a mezzogiorno sta sullo zenit. E' positiva quando il Sole sta al di sopra del piano equatoriale ed è negativa quando il Sole è al di sotto di esso. Considerata l'elevata distanza tra Sole e Terra ed il fatto che il primo ha un diametro circa cento volte maggiore, i raggi solari investono il nostro pianeta tutti paralleli tra di loro ed alla linea immaginaria che congiunge i due centri.

La declinazione solare δ può essere calcolata per mezzo della formula approssimata di Cooper:

$$\boldsymbol{\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360°}{365} \cdot (284 + J)\right]}$$

Dove J rappresenta il giorno Giugliano, ovvero il numero cardinale corrispondente al giorno dell'anno; al primo Gennaio corrisponde 1, al 31 Dicembre corrisponde 365.

4.4.2. Angolo orario ω

E' la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la Terra affinché il Sole si porti sopra il meridiano locale. Risulta nullo a mezzogiorno, positivo nelle ore antimeridiane e negativo nelle ore pomeridiane. Il mezzogiorno è, in generale, l'istante di culminazione del Sole in meridiano, dove per culminazione si intende il passaggio di un corpo celeste attraverso il meridiano locale. Considerando che la Terra ruota di 15° all'ora esso risulta pari al numero di ore di distanza dal mezzogiorno moltiplicato per 15 (poiché la Terra ruota di 15 gradi all'ora alla velocità nominale di 360 gradi al giorno). L'angolo orario si calcola con la seguente formula:

$$\boldsymbol{\omega = 180° - 15 \cdot t_{solare}}$$

Nella quale t_{solare} rappresenta l'ora solare del meridiano dell'osservatore espressa in ore e può essere calcolata a partire dall'ora solare convenzionale t_{conv} letta dall'orologio corretta con la seguente formula:

$$\boldsymbol{t_{solare} = t_{conv} + \frac{[E_t - 4 \cdot (\lambda_{mer} - \lambda_{oss})]}{60}}$$

Per capire la correzione bisogna considerare che il Perù, per esempio, è 5 ore indietro rispetto all'ora del meridiano di Greenwich ma questo è vero solo per i punti che stanno a

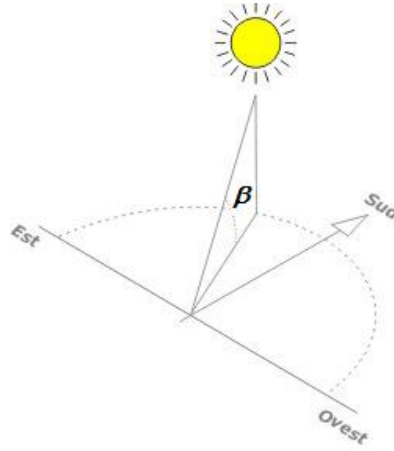
75° Ovest di longitudine, quindi $\lambda_{mer} = -75°$. Per tutti gli altri punti del territorio, anche se vige la stessa ora, la longitudine è diversa da $-75°$ ed uguale a λ_{oss}: nel caso specifico di Vilcabamba $\lambda_{oss} = -72.39°$.

E_t si calcola invece con un'equazione che tiene conto del fatto che la Terra varia la sua velocità di rivoluzione attorno al Sole durante l'anno:

$$\boldsymbol{E_t = -10.1 \cdot \sin\left(360° \cdot \frac{2 \cdot J + 31}{366}\right) - 6.9 \cdot \sin\left(360° \cdot \frac{J}{366}\right)}$$

Dalla combinazione di questi parametri astronomici e della longitudine del sito (parametro geografico) è possibile derivare i parametri che congiuntamente descrivono l'arco parabolico del Sole durante il giorno, per ogni giorno dell'anno.

4.4.3. Altezza del Sole β

E' l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale.

Si calcola con la seguente formula:

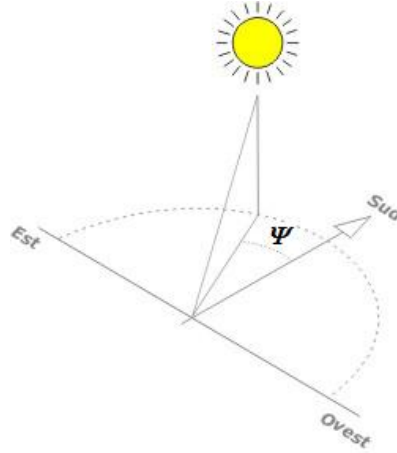
$$\boldsymbol{\beta = \sin^{-1}[\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)]}$$

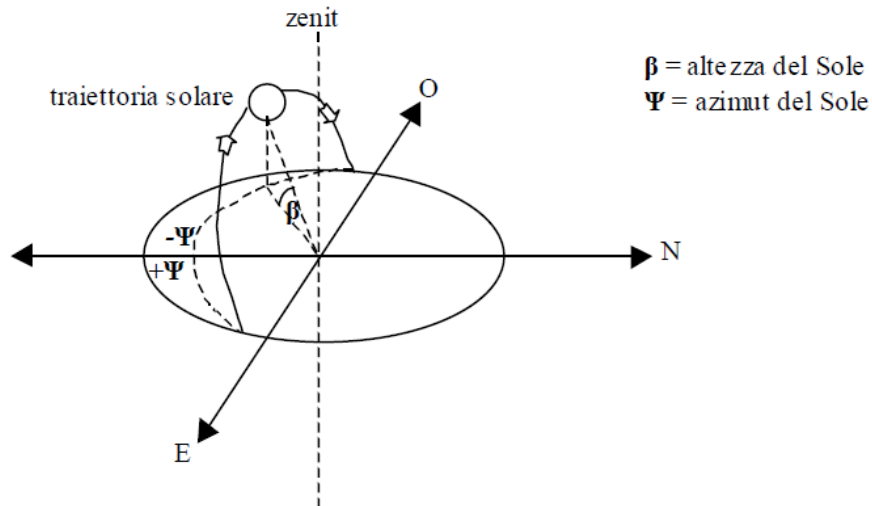
Ponendo $\beta = 0$ è possibile ricavare l'angolo orario dell'alba (ω_A), e per simmetria quello del tramonto (ω_T), e conseguentemente la durata del giorno (D):

$$\boldsymbol{\omega_A = 180° - \omega_T = \cos^{-1}[-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)]}$$

$$\boldsymbol{D = \frac{2}{15} \cdot \omega_A}$$

4.4.4. Angolo azimutale solare Ψ

E l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione Sud; è positivo se la proiezione cade verso Est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso Ovest (dopo mezzogiorno).

L'angolo azimutale solare si calcola con la seguente formula:

$$\boldsymbol{\Psi = \cos^{-1}\left[\frac{\sin(\beta)\cdot\sin(\phi)-\sin(\delta)}{\cos(\beta)\cdot\cos(\phi)}\right]}$$

Una volta noti tutti questi angoli, è possibile calcolare l'angolo di incidenza della radiazione solare su ogni superficie i-esima, in funzione della giacitura (Ψ_i , α_i) di quest'ultima, con la seguente formula:

$$\boldsymbol{\theta_i = \cos^{-1}[\cos(\beta)\cdot\cos(\Psi-\Psi_i)\cdot\sin(\alpha_i)+\sin(\beta)\cdot\cos(\alpha_i)]}$$

4.5. Radiazione incidente sulle superfici esterne della serra

Nel caso in cui non si disponga di dati meteorologici sufficienti, per poter impostare il modello di trasferimento di calore, sarà necessaria una previa simulazione della radiazione solare. Per il calcolo è stato adottato il modello di Campbell e Norman, secondo il quale, è possibile approssimare le componenti diretta, diffusa e riflessa della radiazione solare, a partire dal valore della radiazione solare diretta incidente su di una superficie normale ai raggi del Sole $\left(I_{h,n}(\phi)\right)$, data dalla seguente formula:

$$\boldsymbol{I_{h,n}(\phi) = a^{m(\phi)} \cdot I_0}$$

Dove:

- I_0 rappresenta la costante solare, ovvero la quantità di radiazione che arriva sulla Terra dal Sole per unità di tempo e superficie (quindi una potenza per unità di superficie, W/m^2), misurata sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre, su un piano perpendicolare ai raggi.

$$\boldsymbol{I_0 = 1360\ \frac{W}{m^2} \pm 0.5}\%$$

- $m(\phi)$ rappresenta il numero ottico calcolato in funzione della pressione atmosferica del sito (p), della pressione atmosferica a livello del mare (p_0) e dell'altezza del Sole β:

$$\boldsymbol{m(\phi) = \frac{p}{p_0 \cdot \sin(\beta)}}$$

- a rappresenta il coefficiente di trasmissione atmosferica, ovvero la frazione di radiazione solare in grado di penetrare al suolo. Dipende dalla copertura nuvolosa:

  - Vale 0.9 per un cielo molto limpido;
  - Vale 0.6 per un cielo molto coperto;
  - Vale 0.84 per un generico giorno "sereno".

A partire da $I_{h,n}(\phi)$ è possibile derivare le singole componenti della radiazione, calcolate dapprima per una superficie orizzontale e successivamente ricavate in funzione dell'angolo di incidenza (θ_i):

$$\boldsymbol{I_{h,b}(\phi) = I_{h,n}(\phi) \cdot \sin(\beta)}$$

$$\boldsymbol{I_{h,d}(\phi) = 0.3 \cdot \left[1 - a^{m(\phi)}\right] \cdot I_0 \cdot \sin(\beta)}$$

$I_{h,b}(\phi)$ e $I_{h,d}(\phi)$ rappresentano rispettivamente la componente diretta e la componente diffusa della radiazione solare incidente su una superficie orizzontale. Da questi due valori sarà possibile derivare le componenti diretta $I_{t,b}(\phi)$, diffusa e riflessa $I_{t,d}(\phi)$ su una superficie comunque orientata. Normalmente la radiazione diffusa è proporzionale ad fattore di vista tra la superficie esaminata e la volta celeste. Per semplificare il modello, è stato imposto un fattore di vista unitario di tutte le superfici considerate, in modo da includere nel termine di radiazione diffusa, anche la componente riflessa dall'ambiente circostante. Altrimenti sarebbe stato molto complicato, a livello geometrico, specificare la frazione di radiazione riflessa internamente ed esternamente alla serra, in funzione del percorso solare.

$$\boldsymbol{I_{t,b}(\phi)_i = I_{h,b}(\phi) \cdot \frac{cos(\theta_i)}{sin(\beta)}}$$

$$\boldsymbol{I_{t,d}(\phi)_i = I_{h,d}(\phi)}$$

Con questo metodo è possibile calcolare agevolmente la radiazione solare incidente sulla parte esterna delle superfici formanti la serra, e quindi in particolare le pareti, la copertura in agrofilm e, quando presente, la coperta in nylon.

$$\boldsymbol{I_{t,T}(\phi)_i = I_{t,b}(\phi)_i + I_{t,d}(\phi)_i}$$

Detta $I_{t,T}(\phi)_i$ la radiazione totale incidente sulla superficie i-esima, per unità di superficie (misurata quindi in W/m^2), risulta immediato calcolare l'energia termica totale assorbita nell'unità di tempo (misurata in W) con la seguente formula:

$$\boldsymbol{(q_{Sole-i})_{esterno} = I_{t,T}(\phi)_i \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i}$$

dove A_i rappresenta l'area della superficie i-esima e α_{λ_i} il coefficiente spettrale di assorbimento caratteristico del materiale costituente tale superficie.

4.6. Radiazione incidente sulle superfici interne della serra

La radiazione solare raggiunge tuttavia anche le superfici interne alla serra, come la parte interna delle pareti in adobes e la parte della geomembrana in PVC emergente dalla fossa di alloggiamento. Per tali superfici interne, il calcolo della radiazione solare è più complicato, per una serie di ragioni, fisiche, ottiche e geometriche.

4.6.1. Componente diretta della radiazione incidente sulle superfici interne

La radiazione solare diretta sulle superfici ubicate all'interno della serra, è una frazione della radiazione diretta sulla copertura in agrofilm. Uno dei fattori di proporzionalità è dato dal coefficiente spettrale di trasmissione dell'agrofilm $\left(\tau_{\lambda_C}\right)$: quest'ultimo, oltre a dipendere dalla lunghezza d'onda della radiazione, varia in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari, ma in prima approssimazione è stato considerato costante e pari a 0.65. Chiaramente, ogni parete avrà un lato esposto verso un punto cardinale e l'altro verso il punto cardinale opposto. Pertanto la componente diretta sul lato interno della parete i dipenderà dall'angolo di incedenza dei raggi solari sulla superficie esterna della parete dirimpetto j. Un altro fattore di proporzionalità è legato alla posizione del Sole ed è pertanto chiamato fattore di ombra. La geometria del sotto-sistema *"interno della serra"* infatti, è tale per cui, al variare dell'altezza e dell'azimut solari, le pareti si facciano mutuamente da schemo, ombreggiandosi. Ovviamente anche la geomembrana risente di tali fenomeni. Nota la geometria del sistema è stato possibile calcolare una serie di angoli critici per ciascuna superficie interna alla serra, ad eccezione del lato interno della parete Nord (ovvero esposto a Sud). In quest'ultimo caso si è ritenuto ragionevole trascurare il contributo sul lato interno in quanto il Sole è rivolto a Sud solo per un breve periodo dell'anno, che va dal 29 Ottobre fino al 12 Febbraio compresi (come si può riscontrare dai diagrammi dei percorsi solari riportati in Allegato A2), e durante il quale la sua altezza rispetto all'orizzonte è molto alta, formando un angolo ottuso con la copertura della serra e quindi riducendo di molto, almeno dal punto di vista teorico (visto che è considerato costante) il coefficiente di trasmissione dell'agrofilm.

Tabella 4.4 – Parametri geometrici e costruttivi di interesse per il calcolo degli angoli critici

Altezza della parete Nord	$h_1 = h_N$	*m*	0.35
Altezza della parete Sud	$h_2 = h_S$	*m*	1.2
Larghezza interna della serra	W	*m*	1.7
Lunghezza interna della serra	L_{int}	*m*	8.1

Tabella 4.5 – Angoli critici tra le pareti per irraggiamento all'interno della serra attraverso la copertura in agrofilm

Angoli critici per la parete Sud			***Angoli critici per la parete Est***			***Angoli critici per la parete Ovest***			***Angoli critici per la geomembrana***		
$\alpha_{cr\ N\text{-}S}$	° rispetto al piano orizzontale	11.63	$\alpha_{cr\ N\text{-}E}$	° rispetto al piano orizzontale	11.63	$\alpha_{cr\ N\text{-}O}$	° rispetto al piano orizzontale	11.63	$\alpha_{cr\ N\text{-}G}$	° rispetto al piano orizzontale	11.63
$\alpha_{cr\ E\text{-}S}$	° rispetto all'Est	11.85	$\alpha_{cr\ S\text{-}E}$	° rispetto al piano orizzontale	90.00	$\alpha_{cr\ S\text{-}O}$	° rispetto al piano orizzontale	90.00	$\alpha_{cr\ E\text{-}G}$	° rispetto all'Est	11.85
$\alpha_{cr\ O\text{-}S}$	° rispetto all'Est	168.15	$\alpha_{cr\ O\text{-}E}$	° rispetto all'Est	168.15	$\alpha_{cr\ E\text{-}O}$	° rispetto all'Est	11.85	$\alpha_{cr\ O\text{-}G}$	° rispetto all'Est	168.15

Gli angoli critici sono stati calcolati tramite le seguenti formule:

$$\boldsymbol{\alpha_{cr\,N-S} = \alpha_{cr\,N-E} = \alpha_{cr\,N-O} = \alpha_{cr\,N-G} = \tan^{-1}\left(\frac{h_N}{W}\right)}$$

$$\boldsymbol{\alpha_{cr\,E-S} = \alpha_{cr\,E-O} = \alpha_{cr\,E-G} = \tan^{-1}\left(\frac{L_{int}}{W}\right)}$$

$$\boldsymbol{\alpha_{cr\,O-S} = \alpha_{cr\,O-E} = \alpha_{cr\,O-G} = 180° - \tan^{-1}\left(\frac{L_{int}}{W}\right)}$$

$$\boldsymbol{\alpha_{cr\,S-E} = \alpha_{cr\,S-O} = \alpha_{cr\,S-G} = 90°}$$

I suddetti angoli determinano dei valori limite, per gli angoli di altezza e azimut solare, oltre i quali le superfici interne alla serra non sono più visibili dall'esterno e quindi suscettibili di ricevere la componente diretta della radiazione solare. In realtà per quanto riguarda il calcolo degli angoli critici delle pareti Est ed Ovest nei confronti della parete Sud e della geomembrana, si sta assumendo che la forma delle pareti laterali sia regolare e rettangolare anziché trapezoidale; tale assunzione, nonostante restringa l'angolo solido entro il quale l'interno della serra sia visibile, non introduce una severa penalizzazione, in quanto, come già detto, il coefficiente di trasmissione di un mezzo tende ad annullarsi laddove la fonte radiativa sia molto *defilata*. Per le medesime ragioni, l'angolo critico tra la parete Sud e le superfici interne è stato posto uguale a 90°, ipotizzando che, oltre tale altezza, il Sole si trovi a Sud e quindi formante un angolo ottuso con la copertura in agrofilm. Può essere dunque istituito un range di valori ammissibili degli angoli di posizione del Sole:

$$\boldsymbol{\tan^{-1}\left(\frac{h_N}{W}\right) < \beta < 90°}$$

$$\boldsymbol{\tan^{-1}\left(\frac{L_{int}}{W}\right) < \Psi < 180° - \tan^{-1}\left(\frac{L_{int}}{W}\right)}$$

All'interno del range di visibilità invece la porzione di area effettivamente soggetta ad irraggiamento, varia in funzione della posizione del Sole e quindi in funzione dell'altezza e dell'azimut. Sono stati pertanto introdotti dei coefficienti moltiplicativi trigonometrici che modificano proporzionalmente l'area delle superfici irraggiate.

$$\boldsymbol{F_{ombra-S} = \cos(\beta) \cdot \cos(\Psi)}$$

$$\boldsymbol{F_{ombra-E} = F_{ombra-O} = \cos(\beta) \cdot \sin(\Psi)}$$

$$\boldsymbol{F_{ombra-G} = \sin(\beta) \cdot \cos(\Psi)}$$

Il fattore di ombra relativo alla parte interna della parete Nord è invece nullo, poiché come detto precedentemente, si sta trascurando la radiazione incidente su tale superficie.

Mettendo insieme i diversi fattori moltiplicativi, si ottiene la seguente formulazione della componente diretta della radiazione incidente sulle superfici interne alla serra:

$$\left(q_{Sole,diretta-i}\right)_{interno} = I_{t,b}(\phi)_j \cdot \tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i \cdot F_{ombra-i}$$

4.6.2. Componente diffusa della radiazione incidente sulle superfici interne

La componente diffusa della radiazione solare incidente sulle superfici interne alla serra è pari alla radiazione diffusa che raggiunge la copertura in agrofilm (abbiamo considerato il fattore di vista unitario e quindi tutte le superfici, comuqneue orientate ricevono la stessa componente di radiazione diffusa), a meno di alcuni fattori di proporzionalità. Anch'essa dipende, inevitabilmente, dal coefficiente di trasmissione della copertura. Inoltre, l'altro elemento di proporzionalità è dato dai fattori di vista tra la copertura e le diverse superfici interne.

La componente di radiazione solare diffusa che raggiunge la superficie i-esima interna alla serra, sarà pertanto:

$$\left(q_{Sole,diffusa-i}\right)_{interno} = I_{t,d}(\phi)_i \cdot \tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i \cdot F_{vista_{i-C}}$$

Il fattore di vista $F_{vista_{j-i}}$ rappresenta la frazione dell'area del corpo j vista dal corpo i, e quindi è la frazione della radiazione che parte da j ed intercetta i. Per i fattori di vista vale la proprietà di reciprocità:

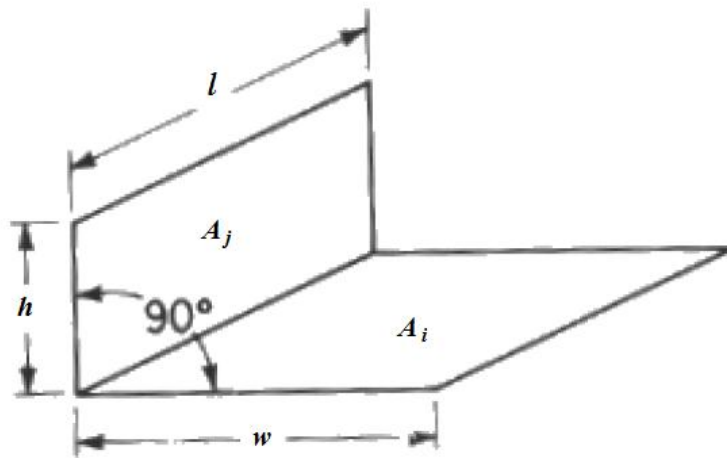
$$F_{vista_{j-i}} \cdot A_j = F_{vista_{i-j}} \cdot A_i$$

All'interno di una cavità, come può essere perlappunto considerato l'interno della serra (sotto la ipotesi che sia la copertura di agrofilm, sia la geomembrana di PVC siano non trasparenti nei confronti della radiazione infrarossa), la somma dei coefficienti di vista tra una superficie e le altre, per la legge di conservazione dell'energia, deve essere unitario:

$$\sum_{i=1}^{n} F_{vista_{j-i}} = 1$$

A questo punto non resta che il calcolo dei fattori di vista attraverso una formulazione analitica. In prima approssimazione possiamo vedere il sistema come un parallelepipedo regolare, quindi ipotizzando:

- trascurabile l'inclinazione della copertura in agrofilm;
- trascurabile la curvatura della cupola del reattore in geomembrana di PVC;
- rettangolare la forma delle pareti Est ed Ovest, in realtà trapezoidali.

In tal caso, si potrebbe ricorrere alla formulazione più semplice di fattore di vista, ovvero quella tra due superfici rettangolari perpendicolari tra loro ed aventi un lato in comune.

Dove:

- l rappresenza la lunghezza del lato in comune tra le 2 superfici;
- h rappresenta l'altezza della superficie j-esima;
- w rappresenta la larghezza della superficie i-esima.

Da questi parametri noti dalla geometria del sistema è possibile ricavare i seguenti rapporti:

$$\boldsymbol{Z_{i-j} = \frac{h_j}{l_{i-j}}} \quad ; \quad \boldsymbol{X_{i-j} = \frac{w_i}{l_{i-j}}}$$

$$F_{vista_{i-j}} = \frac{1}{\pi \cdot X_{i-j}} \cdot \left\{ X_{i-j} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{X_{i-j}}\right) + Z_{i-j} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{Z_{i-j}}\right) - \sqrt{\left(Z_{i-j}\right)^2 + \left(X_{i-j}\right)^2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\left(Z_{i-j}\right)^2 + \left(X_{i-j}\right)^2}}\right) + \frac{1}{4} \cdot ln\left[\frac{\left(1 + \left(X_{i-j}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right)}{1 + \left(X_{i-j}\right)^2 + \left(Z_{i-j}\right)^2} \cdot \left[\frac{\left(X_{i-j}\right)^2 \cdot \left(1 + \left(X_{i-j}\right)^2 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right)}{\left(1 + \left(X_{i-j}\right)^2\right) \cdot \left(\left(X_{i-j}\right)^2 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right)}\right]^{\left(X_{i-j}\right)^2} \cdot \left[\frac{\left(Z_{i-j}\right)^2 \cdot \left(1 + \left(X_{i-j}\right)^2 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right)}{\left(1 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right) \cdot \left(\left(X_{i-j}\right)^2 + \left(Z_{i-j}\right)^2\right)}\right]^{\left(Z_{i-j}\right)^2}\right]\right\}$$

Il calcolo dei fattori di vista tra la copertura e le superfici procede nel seguente modo:

1. Calcolo del fattore di vista tra la copertura e la parete Sud, con riferimento alle dimensioni reali delle superfici;
2. Calcolo del fattore di vista tra la copertura e la parete Nord, con riferimento alle dimensioni reali delle superfici;
3. Calcolo del fattore di vista tra la copertura e le pareti laterali, Est e Ovest, nell'ipotesi che la forma delle pareti sia rettangolare, avente come come larghezza, la larghezza della copertura, e come altezza, l'altezza del rettangolo equivalente al trapezio (forma reale della parete);
4. Calcolo del fattore di vista tra la copertura e la geomembrana, come complemento a 1 dei suddetti.

4.6.3. Componente riflessa della radiazione incidente sulle superfici interne

Come prima anticipato, per semplicità la componente riflessa della radiazione incidente sulle superfici interne alla serra viene inclusa nel calcolo della radiazione diffusa.

In definitiva, la radiazione solare totale incidente sulle superfici interne alla serra è:

$$\left(q_{Sole,Totale-i}\right)_{interno} = \left(q_{Sole,diretta-i}\right)_{interno} + \left(q_{Sole,diffusa-i}\right)_{interno}$$

$$\left(q_{Sole,Totale-i}\right)_{interno} = \left[\tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i\right] \cdot \left[\left(I_{t,d}(\phi)_i \cdot F_{vista_{i-C}}\right) + \left(I_{t,b}(\phi)_j \cdot F_{ombra-i}\right)\right]$$

4.7. Trasferimento di calore per irraggiamento tra le diverse superfici interne alla serra

Lo scambio netto di energia radiante, misurato in W, tra due corpi grigi è pari a:

$$q_{i-j} = \frac{\sigma \cdot \left(T_i^4 - T_j^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_i} \cdot A_i} + \frac{1}{F_{vista_{i-j}} \cdot A_i} + \frac{1-\varepsilon_{\lambda_j}}{\varepsilon_{\lambda_j} \cdot A_j}}$$

Dove, σ rappresenta la costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$, ε_λ rappresenta il coefficiente spettrale di emissività della superficie, considerata come corpo grigio.

In fisica, in particolare in termodinamica, si definisce corpo grigio un corpo la cui emissività è costante su tutto lo spettro elettromagnetico. L'analogia con il colore grigio è dovuta al fatto che un oggetto che appare di tale colore ha la caratteristica di assorbire allo stesso modo la luce a tutte le frequenze dello spettro visibile.

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon(\lambda) = \varepsilon$$

Nell'ipotesi semplificativa adottata, le superfici interne alla serra sono state considerate come corpi neri, al fine di valutare gli effetti del fenomeno di riflessione internamente alla serra.

In fisica un corpo nero è un oggetto (ideale) che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e quindi né riflette né trasmette alcuna energia apparendo in prima approssimazione nero, secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi (entro i limiti della propria emissività termica). Non riflettendo il corpo nero assorbe dunque tutta l'energia incidente e, per la conservazione dell'energia, re-irradia in funzione della sua temperatura, parte dell'energia assorbita (coefficiente di emissività uguale a quello di assorbimento e pari ad uno) e deve quindi il suo nome unicamente all'assenza di riflessione.

$$\boldsymbol{\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1}$$

Lo spettro (intensità o densità della radiazione emessa in funzione della lunghezza d'onda) di un corpo nero è uno spettro dalla caratteristica forma a *campana* dipendente unicamente dalla sua temperatura T.

La luce emessa da un corpo nero viene detta radiazione del corpo nero e la densità di energia irradiata spettro di corpo nero.

Negli esperimenti un corpo nero è costituito da un oggetto cavo mantenuto a temperatura costante; le pareti di questo oggetto cavo (una sorta di forno) emettono e assorbono continuamente radiazioni elettromagnetiche di tutte le possibili lunghezze d'onda dello spettro. Tale fenomeno dipende unicamente dalla temperatura e non dal materiale utilizzato.

Nel caso di corpo nero, la formula di scambio netto di energia radiante si semplifica:

$$\boldsymbol{q_{i-j} = \sigma \cdot \left(T_i^4 - T_j^4\right) \cdot F_{vista_{i-j}} \cdot A_i}$$

Da cui per la proprietà di reciprocità del fattore di vista è possibile ricavare:

$$\boldsymbol{q_{j-i} = \sigma \cdot \left(T_j^4 - T_i^4\right) \cdot F_{vista_{j-i}} \cdot A_j}$$

E per la legge di conservazione dell'energia:

$$\boldsymbol{q_{i-j} = -q_{j-i}}$$

4.8. Trasferimento di calore per irraggiamento tra le superfici esterne e l'ambiente

Per quanto concerne invece l'irraggiamento tra le superfici esterne e l'ambiente, la formula è ulteriormente semplificata:

$$\boldsymbol{q_{i-A} = -\varepsilon_{\lambda_i}\, \sigma \cdot A_i \cdot T_i^4}$$

Dove ε_{λ_i}è il coefficiente di emissione caratteristico del materiale: infatti sul lato esterno non si applica la ipotesi di corpo nero, ma la superficie è considerata come corpo grigio. È stato trascurato il contributo radiativo della volta celeste.

4.9. Trasferimento di calore convettivo tra le superfici e l'aria

Il calore scambiato convettivamente tra una superficie i e un mezzo j si può calcolare con la seguente formula:

$$q_{i-j} = h_{conv_{i-j}} \cdot A_i \cdot (T_i - T_j)$$

Dove $h_{conv_{i-j}}$ rappresenta il coefficiente di trasferimento di calore convettivo tra la superficie i e il mezzo j espresso in $\frac{W}{K \cdot m^2}$. Tale coefficiente dipende dalle proprietà fisiche e termiche del fluido, dalla geometria della superficie, dalle temperature del fluido e della superficie, ma sopratutto dal campo di moto del fluido.

$$h_{conv_{i-j}} = \frac{Nu_{i-j} \cdot k_j}{L_i^*}$$

Dove:

- k_j rappresenta la conducibilità termica del mezzo, misurata in $\frac{W}{K \cdot m}$;
- L_i^* rappresenta la lunghezza caratteristica della superficie in esame, misurata in m. Per tutte le superfici la lunghezza caratteristica è stata assunta come rapporto tra area e perimetro:

$$L_i^* = \frac{A_i}{P_i}$$

- Nu_{i-j} è il numero di Nusselt tra la superificie e il mezzo, e rappresenta il rapporto tra il calore che viene scambiato per convezione, tra la superficie ed il fluido, ed il calore che la stessa superficie scambierebbe per conduzione attraverso uno strato di fluido fermo di spessore L_i^*. Maggiore è il valore del numero di Nusselt maggiore è l'influenza del trasporto di massa nello scambio termico.

In assenza di dati meteorologici sito-specifici è stato ipotizzato che nel sistema oggetto di studio il fenomeno convettivo sia prevalentemente di origine naturale e non forzata. Nella convezione naturale, il moto del fluido è dovuto alla presenza di forze di galleggiamento, cioè alla contemporanea presenza di un campo di forze di volume (es. gravitazionali) e al gradiente di densità del fluido. Le forze di inerzia e quelle viscose restano importanti, ma un ruolo più importante è giocato dalle forze di galleggiamento. Per la convezione naturale, il numero di Nusselt Nu_{i-j} può essere determinato in funzione di altri parametri adimensionali quali:

- Il numero di Grashof Gr_{i-j} è un gruppo adimensionale utilizzato in fluidodinamica e trasmissione del calore per convezione naturale per misurare gli effetti delle forze

di galleggiamento rispetto alle forze viscose di un fluido, ed è analogo al numero di Reynolds Re_{i-j} ;

$$\boldsymbol{Gr_{i-j} = \frac{g \cdot \beta_j \cdot (T_i - T_j) \cdot (L_i^*)^3}{\nu_j^2}}$$

- Il numero di Prandtl Pr_j il gruppo adimensionale che esprime il rapporto della diffusività cinematica rispetto alla diffusività termica.

$$\boldsymbol{Pr_j = \frac{\nu_j}{\alpha_j}}$$

Dove:

- g rappresenta l'accelerazione di gravità, posta pari a $9.81\ \frac{m}{s^2}$;
- β_j rappresenta il coefficiente di espanzione del mezzo j espresso in K^{-1} ed assunto pari all'inverso della temperatura del mezzo fluido stesso:

$$\boldsymbol{\beta_j = \frac{1}{T_j}}$$

- ν_j rappresenta la viscosità cinematica del mezzo misurata in $\frac{m^2}{s}$;
- α_j rappresenta la diffusività termica del mezzo, definita come il rapporto fra conducibilità termica e il prodotto di densità ρ_j e calore specifico c_{p_j} del corpo oggetto di studio:

$$\boldsymbol{\alpha_j = \frac{k_j}{\left(\rho_j \cdot c_{p_j}\right)}}$$

La diffusività termica è una caratteristica intrinseca del corpo in quanto dipende esclusivamente da parametri relativi al materiale di cui è composto. Come tutti i coefficienti di diffusione è misurata in $\frac{m^2}{s}$ nel sistema internazionale.

Il numero di Rayleigh Ra_{i-j}, invece, viene definito come il prodotto tra il numero di Grashof ed il numero di Prandtl:

$$\boldsymbol{Ra_{i-j} = Gr_{i-j} \cdot Pr_j = \frac{g \cdot \beta_j \cdot (T_i - T_j) \cdot (L_i^*)^3}{\nu_j \cdot \alpha_j}}$$

La formulazione del numero di Nusselt varia in funzione del valore assunto dal numero di Rayleigh:

- Se $Ra_{i-j} \leq 10^9$:

$$\boldsymbol{Nu_{i-j} = 0.68 + \frac{0.67 \cdot \left(Ra_{i-j}\right)^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr_j}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}}$$

- Se $Ra_{i-j} > 10^9$:

$$\boldsymbol{Nu_{i-j} = \left\{0.825 + \frac{0.387 \cdot \left(Ra_{i-j}\right)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr_j}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right\}^2}$$

Con le suddette formule è possibile calcolare i coefficienti di trasferimento di calore convettivo per tutti i casi presenti nel sistema oggetto di studio, e vale a dire:

- Trasferimento di calore convettivo tra le superfici interne alla serra e l’aria interna alla serra, a cui corrisponderà un $h_{conv_{i-V}}$;
- Trasferimento di calore convettivo tra le superfici esterne e l’ambiente $h_{conv_{i-A}}$;
- Trasferimento di calore convettivo tra la cupola della geomembrana e il biogas in essa contenuto $h_{conv_{i-B}}$.

4.10. Trasferimento di calore conduttivo tra il suolo e lo slurry

L’ultima modalità con cui viene trasmesso calore tra le parti del sistema è la conduzione. In particolare, secondo le ipotesi introdotte, tale fenomeno si registra solamente tra il suolo circostante la fossa di alloggiamento e lo slurry contenuto nel reattore tubolare. La formulazione è la seguente:

$$\boldsymbol{q_{i-j} = h_{cond_{i-j}} \cdot A_{i-j} \cdot \left(T_i - T_j\right)}$$

Dove:

- A_{i-j} è la superficie di contatto tra il materiale i e il materiale j;
- $h_{cond_{i-j}}$ rappresenta il coefficiente di trasferimento conduttivo tra i due materiali.

Nel caso in cui i materiali tra cui avviene lo scambio termico siano separati da una interfaccia costituita da un solo mezzo isolante, il coefficiente di trasferimento conduttivo assume la seguente forma:

$$\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{cond}_{\boldsymbol{i-j}}} = \frac{\boldsymbol{k}_{\boldsymbol{isol}}}{\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{isol}}}$$

Dove k_{isol} e δ_{isol} rappresentano rispettivamente la conduttività termica e lo spessore del material isolante. Nel caso in esame, tuttavia, si è in presenza di uno strato isolante composito, ovvero formato da diversi materiali, ciascuno con il relativo spessore.

Tabella 4.6 – Isolamento tra suolo circostante la fossa di alloggiamento e slurry contenuto nel reattore

Materiale isolante	*Simbolo*	*k (W m^{-1} K^{-1})*	*δ (m)*	*h (W m^{-2} K^{-1})*
Polietilene a bassa densità	*LDPE*	*0.33*	*0.0002*	*1650*
Polistirene	*PS*	*0.04*	*0.1*	*0.4*
Policloruro di vinile	*PVC*	*0.17*	*0.001*	*170*
Totale	*LDPE+PS+PVC*			*0.40*

Il coefficiente di trasferimento di calore conduttivo è stato calcolato considerando il caso di materiali differenti disposti in serie:

$$\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{cond}_{\boldsymbol{SU-(SL+B)}}} = \frac{\mathbf{1}}{\sum \frac{\mathbf{1}}{\left(\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{cond}_{\boldsymbol{i-j}}}\right)_{\boldsymbol{isol}}}} = \frac{\mathbf{1}}{\sum \frac{\mathbf{1}}{\left(\frac{\boldsymbol{k}_{\boldsymbol{isol}}}{\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{isol}}}\right)}}$$

Come si evince dai valori riportati in Tabella 4.6, il coefficiente globale non risente significativamente della presenza di due materiali come il PVC e il LDPE, il cui impiego non è rivolto principalmente all'isolamento termico, quanto più ad un isolamento igroscopico (LDPE) e ad un semplice effetto contenitivo (PVC). L'effetto secondario, quasi trascurabile, di tali materiali plastici è anche ovviamente dovuto all'esiguo spessore che essi presentano.

Per quanto riguarda invece il calcolo della superficie di contatto A_{i-j}, si è fatto ricorso alla geometria del sistema. Oltre alle dimensioni sopra riportate, sono determinanti la profondità p dello scavo e l'inclinazione α_P , rispetto alla verticale, delle pareti della fossa di alloggiamento.

$$\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{SU-(SL+B)}} = \left[\frac{\mathbf{2} \cdot p}{\mathbf{cos}(\boldsymbol{\alpha_F})} + \boldsymbol{W} - \mathbf{2} \cdot p \cdot \mathbf{sin}(\alpha_P)\right] \cdot \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{int}} + \mathbf{2} \cdot \left[\frac{(\mathbf{2} \cdot \boldsymbol{W} - \mathbf{2} \cdot p \cdot \mathbf{sin}(\alpha_P)) \cdot p}{\mathbf{2}}\right]$$

4.11. Dinamica dei fenomeni di scambio termico all'interno del reattore

Il sotto-sistema costituito dal reattore anaerobico, schematizzato in Figura 4.2, è composto da tra 3 diverse fasi:

- Slurry, ovvero il materiale in digestione;
- Vapore acqueo originatosi per evaporazione di una frazione del liquido dello slury;
- Biogas secco, per semplicità considerato essere una miscela bifase di metano al 60% e di anidride carbonica al 40%. La massa di biogas secco contenuta all'interno della cupola gasometrica è stata considerata costante. La componente secca del biogas sommata al vapore acqueo rappresentano la massa effettiva di biogas (BS + VA = B).

Per ipotesi la produzione di biogas secco Δm_{BS} è stata considetata costante nel tempo. A regime è prevista una produzione su base giornaliera di circa 1 m^3 di biogas. Non disponendo di dati di sito a cui poter fare affidamento, ci si è posti in condizioni di ottimale funzionamento dell'impianto. Considerando il contenuto massico X_{VA} di vapore acqueo, la massa di biogas Δm_B complessivamente uscente dal sistema nell'unità di tempo Δt è pari a:

$$\boldsymbol{\Delta m_B = \Delta m_{BS} \cdot (1 + X_{VA})}$$

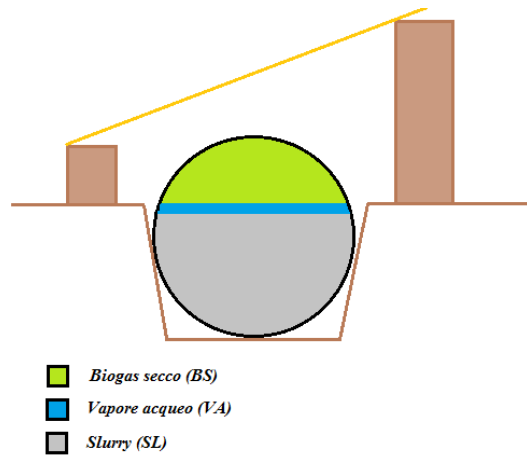



Figura 4.2 – Schema della composizione del contenuto del reattore

Conseguentemente, in assenza di alimentazione di ingestato e/o spurgo di biol, il bilancio di massa del contenuto del reattore m_{SL+B} tra due istanti successivi sarà:

$$\boldsymbol{m_{SL+B}^{k+1} = m_{SL+B}^{k} - \Delta m_{BS} \cdot \left(1 + X_{VA}^{k}\right)}$$

$$X_{VA}^{k} = \frac{m_{VA}^{k}}{m_{BS}} = \frac{x_{H_2O}}{1 - x_{H_2O}} \cdot \frac{\mathcal{M}_{H_2O}}{\mathcal{M}_{BS}} = \frac{\frac{p_{sat}(T^k)}{p_{tot}}}{1 - \frac{p_{sat}(T^k)}{p_{tot}}} \cdot \frac{\mathcal{M}_{H_2O}}{\mathcal{M}_{BS}}$$

Dove x_{H_2O} è la frazione molare di vapore acqueo contenuto nel biogas, $\mathcal{M}_{H_2O}$ e $\mathcal{M}_{BS}$ sono rispettivamente le masse molari di acqua e biogas secco (60% CH_4 e 40% CO_2), p_{tot} è la pressione atmosferica del sito e $p_{sat}(T^k)$ rappresenta la pressione di saturazione del vapore in funzione della temperatura dello slurry all'istante k-esimo, espressa in bar.

$$\mathcal{M}_{H_2O} = 2 \cdot \frac{1\ g\ H}{mol\ H} + 1 \cdot \frac{16\ g\ O}{mol\ O} = 18\ \frac{g\ H_2O}{mol\ H_2O}$$

$$\mathcal{M}_{BS} = 0.6 \cdot \left(1 \cdot \frac{12\ g\ C}{mol\ C} + 4 \cdot \frac{1\ g\ H}{mol\ H}\right) + 0.4 \cdot \left(1 \cdot \frac{12\ g\ C}{mol\ C} + 2 \cdot \frac{16\ g\ O}{mol\ O}\right) = 27.2\ \frac{g\ BS}{mol\ BS}$$

$$p_{tot} = p_{atm} = 0.707\ atm = 71636.775\ Pa = 0.7163678\ bar$$

$$p_{sat}(T^k) = 4.4237 \cdot 10^{-5} \cdot \left(T^k\right)^2 - 0.0245 \cdot \left(T^k\right) + 3.3973$$

Il sistema giornalmente alimentato con 120 litri di ingestato (deiezioni suine diluite con acqua di lavaggio in rapporto 1:3) e spurga circa una pari volumetria di biol, ovvero la frazione liquida del digestato. La densità dell'ingestato e del biol sono differenti, in quanto il secondo ha un ridotto contenuto di solidi rispetto al primo; tuttavia in prima approssimazione è possibile ipotizzare che al momento dell'alimentazione del reattore, la massa di biol spurgato sia tale da ripristinare la massa complessivamente contenuta nel digestore al valore iniziale.

Il bilancio dell'energia in assenza di alimentazione dell'ingestato e spurgo del biol nell'intervallo infinitesimo di tempo dt è dato da:

$$d\{m_{SL+B} \cdot U_{SL+B}\} = \delta Q_{netto} - dm_{BS} \cdot \left(PCS_{BS} + X_{VA} \cdot PCS_{H_2O}\right)$$

In termini finiti secondo lo schema esplicito sinora adottato:

$$m_{SL+B}^{k+1} \cdot U_{SL+B}^{k+1} = m_{SL+B}^{k} \cdot U_{SL+B}^{k} + \Delta Q_{netto}^{k} - \Delta m_{BS} \cdot \left(PCS_{BS} + X_{VA}^{k} \cdot PCS_{H_2O}\right)$$

$$\Delta Q_{netto}^{k} = \sum_{j}^{N-1} q_{j-(SL+B)} \cdot \Delta t$$

- U_{SL+B} è l’energia interna del contenuto del reattore;
- PCS_{BS} è il potere calorifico superiore del biogas secco, calcolato come media ponderale tra il potere calorifico del metano ed il potere calorifico dell’anidride carbonica (che ha PCS nullo);
- PCS_{H_2O} è il potere calorifico superiore del vapor d’acqua, pari al calore latente di evaporazione $\Delta h_{evap} = 2.44\ \frac{MJ}{kg}$.

$$\boldsymbol{U_{SL+B} = U_{SL} + U_B + U_{VA} = \left\{\left[U_{SL}^0 + c_{V_{SL}} \cdot (T - T_{rif})\right] \cdot \frac{m_{SL}}{m_{SL+B}} + \left[PCS_{BS} + c_{V_{BS}} \cdot (T - T_{rif})\right] \cdot \frac{m_{BS}}{m_{SL+B}} + \left[PCS_{H_2O} + c_{V_{H_2O}} \cdot (T - T_{rif})\right] \cdot \frac{m_{BS} \cdot X_{VA}}{m_{SL+B}}\right\}}$$

In realtà anche l’energia associata al biogas estratto deve tener conto dell’entalpia sensibile; considerando anche il momento dell’alimentazione dell’ingestaato e del simultaneo spurgo dello slurry si ottiene:

$$\boldsymbol{m_{SL+B}^{k+1} \cdot U_{SL+B}^{k+1} = m_{SL+B}^{k} \cdot U_{SL+B}^{k} + \Delta Q_{netto}^{k} - \Delta m_{BS} \cdot \left[PCS_{BS} + X_{VA}^k \cdot PCS_{H_2O} + \left(c_{P_{BS}} + c_{P_{H_2O}} \cdot X_{VA}^k\right) \cdot (T - T_{rif})\right] + \Delta m_{ING} \cdot \left[U_{SL}^0 + c_{V_{SL}} \cdot (T_{ING} - T_{rif})\right] - \Delta m_{biol} \cdot \left[c_{V_{SL}} \cdot (T^k - T_{rif})\right]}$$

Dove:

- c_V rappresenta il calore specifico a volume costante della sostanza considerata;
- c_P rappresenta il calore specifico a pressione costante della sostanza considerata;
- T_{rif} è la temperature di riferimento a cui è stato calcolato il valore del calore specifico a volume/pressione costante utilizzato (25°C);
- T_{ING} è la temperatura dell’ingestato, posta pari alla temperatura di bulbo umido calcolata con la formula di Jeevananda e Reddy:

$$\boldsymbol{T_{ING} = T_{bulbo\,umido} = T_A \cdot \left[0.45 + 0.006 \cdot u \cdot \sqrt{\frac{p}{1060}}\right]}$$

Dove T_A è la temperatura dell’aria ambiente, u è l’umidità relativa dell’aria e p è la pressione atmosferica del sito, espressa in hPa. Dalla precedente relazione è possibile ricavare la temperatura T del contenuto del reattore:

$$\boldsymbol{T = T_{rif} + \frac{U_{SL+B} - U_{SL}^0 + \frac{m_{BS}}{m_{SL+B}} \cdot \left[(1 + X_{VA}) \cdot U_{SL}^0 - PCS_{BS} - X_{VA} \cdot PCS_{H_2O}\right]}{c_{V_{SL}} - \frac{m_{BS}}{m_{SL+B}} \cdot \left[(1 + X_{VA}) \cdot c_{V_{SL}} - c_{V_{BS}} - X_{VA} \cdot c_{V_{H_2O}}\right]}}$$

4.12. Calcolo dei bilanci energetici per le singole parti del sistema

Il più semplice procedimento per approssimare un sistema dinamico continuo con uno discreto è quello di Eulero. Le soluzioni del sistema discreto così ottenuto approssimano le soluzioni del sistema continuo, in un senso che può essere reso rigoroso con la nozione di convergenza uniforme. La differenza tra i due, cioè l'errore di discretizzazione, è una funzione rapidamente crescente con il passo, per cui la potenza di calcolo richiesta per ottenere soluzioni accurate è notevole. Nell’algoritmo di calcolo implicito si utilizza un metodo di calcolo step by step in cui un opportuno criterio di convergenza permette di proseguire o meno l’analisi, eventualmente riducendo l’incremento di tempo, a seconda dell’accuratezza dei risultati al termine di ogni step. Con l’utilizzo del metodo esplicito non si presentano invece eventuali problemi di non convergenza ad una soluzione finita, dato che in questo caso l’analisi non è condizionata da un criterio di convergenza e l’incremento di tempo viene definito all’inizio dell’analisi e rimane costante durante il calcolo.

Il bilancio energetico per la i-esima componente del sistema oggetto di studio, consente di ricavare la temperatura ad ogni istante *k* con la seguente formula:

$$\boldsymbol{T_i^k = T_i^{k-1} + \frac{\Delta t}{m_i \cdot c_{P_i}} \cdot \sum_{j}^{N-1} q_{j-i}}$$

Dove:

- T_i^{k-1} rappresenta la temperatura della compontente i-esima all’istante temporale precedente;
- Δt rappresenta il passo di discretizzazione temporale, costante ed opportunamente stabilito in funzione delle unità di misura e del grado di convergenza del modello;
- m_i e c_{P_i} sono rispettivamente la massa ed il calore specifico della i-esima parte del sistema;
- $\sum_j^{N-1} q_{j-i}$ rappresenta la sommatoria dei contributi di scambio termico tra la componente i-esima e le altre parti del sistema e dell’ambiente circostante. I flussi di calore sono considerati positivi se entranti verso la componente i-esima;
- N è il numero totale di variabili del modello, comprendenti sia le variabili corrispondenti alle parti del sistema, che le variabili corrispondenti all’ambiente circostante: pertanto gli scambi termici avvengono sempre tra una parte e le restanti $N-1$.

In Tabella 4.7 sotto riportata sono specificate le proprietà fisiche e termiche dei materiali impiegati per la realizzazione dell’impianto e dei materiali costituenti gli elementi naturali del sistema e dell’ambiente circostante. Le masse sono state calcolate come prodotto tra la densità del materiale, riportata appunto in Tabella, ed il volume della singola componente del sistema. Quest’ultimo è stato desunto dalla geometria nota. A seguire verranno esplicitati i bilanci energetici per ciascuna componente del sistema.

Tabella 4.7 – Caratteristiche fisiche dei materiali impiegati per la realizzazione dell'impianto

Caratteristiche del materiali	*Simbolo*	*Unità di misura*	*Mattoni di adobe*	*Suolo*	*Polistirene*	*Nylon*	*Agrofilm*	*LDPE*
Densità	ρ	$kg\ m^{-3}$	1500	1500	20	1150	920	920
Calore specifico	c_p	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	1000	1000		1750	2200	2200
Conduttività termica	κ ; (λ)	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	0.85	0.85	0.04	0.25	0.33	0.33
Diffusività termica	α	$m^2\ s^{-1}$	8.2593E-07	8.2593E-07				
Numero di Prandtl	Pr							
Coefficiente di assorbimento	α_λ		0.8	0.8		0.6	0.2	0.6
Coefficiente di emissione	ε_λ		0.8	0.8		0.9	0.2	0.9
Coefficiente di riflessione	ρ_λ		0.2	0.2		0.4	0.15	0.4
Coefficiente di trasmissione	τ_λ		0	0		0	0.65	0
Viscosità dinamica	μ	$Pa\ s$						
Viscosità cinematica	ν	$m^2\ s^{-1}$						
Coefficiente di trasferimento di calore conduttivo	h_{cd}	$W\ m^{-2} K^{-1}$	2.125		0.4			1650
Massa molare	$\mathcal{M}$	$kg\ mol^{-1}$						

							Composizione del biogas	
							0.6	***0.4***
Caratteristiche del materiali	*Simbolo*	*Unità di misura*	*Geomembrana PVC*	*Ingestato/slurry*	*Aria*	*Biogas*	*Metano*	*Anidride carbonica*
Densità	ρ	$kg\ m^{-3}$	1400	1000	1.202	1.156	0.68	1.87
Calore specifico	c_p	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	900	4180	1005	1682.2	2237	850
Conduttività termica	κ ; (λ)	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	0.17		0.0265	0.025546	0.03281	0.01465
Diffusività termica	α	$m^2\ s^{-1}$			0.00001972	1.66281E-05	0.000021569	9.2167E-06
Numero di Prandtl	Pr				0.712981744	0.717340787	0.695442533	0.794210509
Coefficiente di assorbimento	α_λ		0.8	0.8	1			
Coefficiente di emissione	ε_λ		0.8	0.8	1			
Coefficiente di riflessione	ρ_λ		0.2	0.2				
Coefficiente di trasmissione	τ_λ		0	0				
Viscosità dinamica	μ	$Pa\ s$			0.0000155	0.0000116	0.0000102	0.0000137
Viscosità cinematica	ν	$m^2\ s^{-1}$			0.00001406	0.000011928	0.000015	0.00000732
Coefficiente di trasferimento di calore conduttivo	h_{cd}	$W\ m^{-2} K^{-1}$	170					
Massa molare	$\mathcal{M}$	$kg\ mol^{-1}$		0.018		0.0272	0.016	0.044

- *Parete Sud*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-S} = (q_{Sole-S})_{esterno} + \left(q_{Sole,Totale-S}\right)_{interno} + q_{A-S} + q_{V-S} + q_{N-S} + q_{E-S} + q_{O-S} + q_{G-S} + q_{C-S} = I_{t,T}(\phi)_S \cdot \alpha_{\lambda_S} \cdot A_S + \left[\tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_S} \cdot A_S\right] \cdot \left[\left(I_{t,d}(\phi)_S \cdot F_{vista_{S-C}}\right) + \left(I_{t,b}(\phi)_N \cdot F_{ombra-S}\right)\right] + \left[h_{conv_{A-S}} \cdot A_S \cdot (T_A - T_S) - \varepsilon_{\lambda_S}\, \sigma \cdot A_S \cdot T_S^4\right] + h_{conv_{V-S}} \cdot A_S \cdot (T_V - T_S) + \sigma \cdot \left(T_N^4 - T_S^4\right) \cdot F_{vista_{S-N}} \cdot A_S + \sigma \cdot \left(T_E^4 - T_S^4\right) \cdot F_{vista_{S-E}} \cdot A_S + \sigma \cdot \left(T_O^4 - T_S^4\right) \cdot F_{vista_{S-O}} \cdot A_S + \sigma \cdot \left(T_G^4 - T_S^4\right) \cdot F_{vista_{S-G}} \cdot A_S + \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_S^4\right) \cdot F_{vista_{S-C}} \cdot A_S$$

- *Parete Nord*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-N} = (q_{Sole-N})_{esterno} + q_{A-N} + q_{V-N} + q_{S-N} + q_{E-N} + q_{O-N} + q_{G-N} + q_{C-N} = I_{t,T}(\phi)_N \cdot \alpha_{\lambda_N} \cdot A_N + \left[h_{conv_{A-N}} \cdot A_S \cdot (T_A - T_N) - \varepsilon_{\lambda_N}\, \sigma \cdot A_N \cdot T_N^4\right] + h_{conv_{V-N}} \cdot A_N \cdot (T_V - T_N) + \sigma \cdot \left(T_S^4 - T_N^4\right) \cdot F_{vista_{N-S}} \cdot A_N + \sigma \cdot \left(T_E^4 - T_N^4\right) \cdot F_{vista_{N-E}} \cdot A_N + \sigma \cdot \left(T_O^4 - T_N^4\right) \cdot F_{vista_{N-O}} \cdot A_N + \sigma \cdot \left(T_G^4 - T_N^4\right) \cdot F_{vista_{S-G}} \cdot A_N + \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_N^4\right) \cdot F_{vista_{N-C}} \cdot A_N$$

- *Parete Est*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-E} = (q_{Sole-E})_{esterno} + \left(q_{Sole,Totale-E}\right)_{interno} + q_{A-E} + q_{V-E} + q_{N-E} + q_{S-E} + q_{O-E} + q_{G-E} + q_{C-E} = I_{t,T}(\phi)_E \cdot \alpha_{\lambda_E} \cdot A_E + \left[\tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_E} \cdot A_E\right] \cdot \left[\left(I_{t,d}(\phi)_E \cdot F_{vista_{E-C}}\right) + \left(I_{t,b}(\phi)_O \cdot F_{ombra-E}\right)\right] + \left[h_{conv_{A-E}} \cdot A_E \cdot (T_A - T_E) - \varepsilon_{\lambda_E}\, \sigma \cdot A_E \cdot T_E^4\right] + h_{conv_{V-E}} \cdot A_E \cdot (T_V - T_E) + \sigma \cdot \left(T_N^4 - T_E^4\right) \cdot F_{vista_{E-N}} \cdot A_E + \sigma \cdot \left(T_S^4 - T_E^4\right) \cdot F_{vista_{E-S}} \cdot A_E + \sigma \cdot \left(T_O^4 - T_E^4\right) \cdot F_{vista_{E-O}} \cdot A_E + \sigma \cdot \left(T_G^4 - T_E^4\right) \cdot F_{vista_{E-G}} \cdot A_E + \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_E^4\right) \cdot F_{vista_{E-C}} \cdot A_E$$

- *Parete Ovest*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-O} = (q_{Sole-O})_{esterno} + \left(q_{Sole,Totale-O}\right)_{interno} + q_{A-O} + q_{V-O} + q_{N-O} + q_{S-O} + q_{E-O} + q_{G-O} + q_{C-O} = I_{t,T}(\phi)_O \cdot \alpha_{\lambda_O} \cdot A_O + \left[\tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_O} \cdot A_O\right] \cdot \left[\left(I_{t,d}(\phi)_O \cdot F_{vista_{O-C}}\right) + \left(I_{t,b}(\phi)_E \cdot F_{ombra-O}\right)\right] + \left[h_{conv_{A-O}} \cdot A_O \cdot (T_A - T_O) - \varepsilon_{\lambda_O} \sigma \cdot A_O \cdot T_O^4\right] + h_{conv_{V-O}} \cdot A_O \cdot (T_V - T_O) + \sigma \cdot \left(T_N^4 - T_O^4\right) \cdot F_{vista_{O-N}} \cdot A_O + \sigma \cdot \left(T_S^4 - T_O^4\right) \cdot F_{vista_{O-S}} \cdot A_O + \sigma \cdot \left(T_E^4 - T_O^4\right) \cdot F_{vista_{O-E}} \cdot A_O + \sigma \cdot \left(T_G^4 - T_O^4\right) \cdot F_{vista_{O-G}} \cdot A_O + \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_O^4\right) \cdot F_{vista_{O-C}} \cdot A_O$$

- *Copertura in agrofilm*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-C} = (q_{Sole-C})_{esterno} + q_{A-C} + q_{V-C} + q_{N-C} + q_{S-C} + q_{E-C} + q_{O-C} + q_{G-C} + q_{NY-C} = I_{t,T}(\phi)_C \cdot \alpha_{\lambda_C} \cdot A_C + \left[h_{conv_{A-C}} \cdot A_C \cdot (T_A - T_C) - \varepsilon_{\lambda_C} \sigma \cdot A_C \cdot T_C^4\right] + h_{conv_{V-C}} \cdot A_C \cdot (T_V - T_C) + \sigma \cdot \left(T_N^4 - T_C^4\right) \cdot F_{vista_{C-N}} \cdot A_C + \sigma \cdot \left(T_S^4 - T_C^4\right) \cdot F_{vista_{C-S}} \cdot A_C + \sigma \cdot \left(T_E^4 - T_C^4\right) \cdot F_{vista_{C-E}} \cdot A_C + \sigma \cdot \left(T_O^4 - T_C^4\right) \cdot F_{vista_{C-O}} \cdot A_C + \sigma \cdot \left(T_G^4 - T_C^4\right) \cdot F_{vista_{C-G}} \cdot A_C + h_{cond_{NY-C}} \cdot A_C \cdot (T_{NY} - T_C)$$

In particolare il termine di scambio termico conduttivo tra la copertura in agrofilm e la coperta in nylon, sarà calcolato solo per le ore in cui tale coperta è effettivamente presente e sarà proporzionale al coefficiente di colore conduttivo così espresso:

$$h_{cond_{NY-C}} = \frac{k_{aria\ stagnante}}{\delta_{aria\ stagnante}}$$

- *Coperta di nylon*

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-NY} = (q_{Sole-NY})_{esterno} + q_{A-NY} + q_{C-NY} = I_{t,T}(\phi)_C \cdot \alpha_{\lambda_{NY}} \cdot A_C + \left[h_{conv_{A-NY}} \cdot A_C \cdot (T_A - T_{NY}) - \varepsilon_{\lambda_{NY}} \sigma \cdot A_C \cdot T_{NY}^4\right] + h_{cond_{NY-C}} \cdot A_C \cdot (T_C - T_{NY})$$

L'impiego della coperta di nylon comporta una complicazione del modello in termini di scrittura delle formule, in funzione della gestione dell'impianto. Infatti nei momenti in cui la coperta non è installata, la radiazione solare riesce a penetrare attraverso la copertura di agrofilm e quindi a raggiungere le superfici interne alla serra. Al contrario quando è presente, trattandosi di un materiale opaco, la coperta di nylon scherma completamente la radiazione solare, che quindi non può cedere calore all'interno della serra. Una volta stabilite t_{NY-up} e $t_{NY-down}$, rispettivamente l'ora in cui viene posta la coperta in nylon sopra l'agrofilm e l'ora in cui viene rimossa, è possibile imporre le seguenti condizioni in funzione dell'ora locale convenzionale t_{conv}:

Se $t_{NY-up} < t_{conv} < t_{NY-down}$ e quindi la coperta in nylon è presente:

$$\left(q_{Sole,Totale-i}\right)_{interno} = 0$$

$$q_{A-C} = 0$$

$$(q_{Sole-C})_{esterno} = 0$$

$$\sum_{j}^{N-1} q_{j-NY} \neq 0$$

E viceversa altrimenti.

- *Geomembrana in PVC*

$$\begin{aligned}\sum_{j}^{N-1} q_{j-G} &= \left(q_{Sole,Totale-G}\right)_{interno} + q_{V-G} + q_{N-G} + q_{S-G} + q_{E-G} + q_{O-G} + q_{C-G} \\ &\quad + q_{(SL+B)-G} \\ &= \left[\tau_{\lambda_C} \cdot \alpha_{\lambda_G} \cdot A_G\right] \cdot \left[\left(I_{t,d}(\phi)_G \cdot F_{vista_{G-C}}\right) + \left(I_{t,b}(\phi)_G \cdot F_{ombra-G}\right)\right] \\ &\quad + h_{conv_{V-G}} \cdot A_G \cdot (T_V - T_G) + \sigma \cdot \left(T_N^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-N}} \cdot A_G + \sigma \\ &\quad \cdot \left(T_S^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-S}} \cdot A_G + \sigma \cdot \left(T_E^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-E}} \cdot A_G + \sigma \\ &\quad \cdot \left(T_O^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-O}} \cdot A_G + \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-C}} \cdot A_G \\ &\quad + \left[\sigma \cdot \left(T_{SL}^4 - T_G^4\right) \cdot F_{vista_{G-(SL+B)}} \cdot A_G + h_{conv_{B-G}} \cdot A_G \cdot (T_B - T_G)\right]\end{aligned}$$

- *Volume di aria interna alla serra*

$$\begin{aligned}\sum_{j}^{N-1} q_{j-V} &= q_{N-V} + q_{S-V} + q_{E-V} + q_{O-V} + q_{G-V} + q_{C-V} \\ &= h_{conv_{N-V}} \cdot A_N \cdot (T_N - T_V) + h_{conv_{S-V}} \cdot A_N \cdot (T_S - T_V) + h_{conv_{E-V}} \cdot A_E \\ &\quad \cdot (T_E - T_V) + h_{conv_{O-V}} \cdot A_O \cdot (T_O - T_V) + h_{conv_{G-V}} \cdot A_G \cdot (T_G - T_V) \\ &\quad + h_{conv_{C-V}} \cdot A_C \cdot (T_C - T_V)\end{aligned}$$

5. Analisi dei risultati e conclusioni

5.1. Analisi del modello di radiazione solare

Il modello di Cambell e Norman (1998) permette di ottenere i dati di radiazione solare a partire solamente dalle coordinate del sito studiato e assumendo un coefficiente di trasmissione atmosferico a. È stato assegnato un valore pari a 0.65, che corrisponde ad una non trascurabile presenza di copertura nuvolosa durante tutto il periodo dell'anno (vedere Allegato A3). Come primo aspetto è stata studiata l'influenza dell'orientamento rispetto al Nord e dell'inclinazione di una generica superficie rispetto all'orizzontale; questi due parametri vanno a modificare l'angolo con cui la radiazione solare incide sulla superficie stessa.

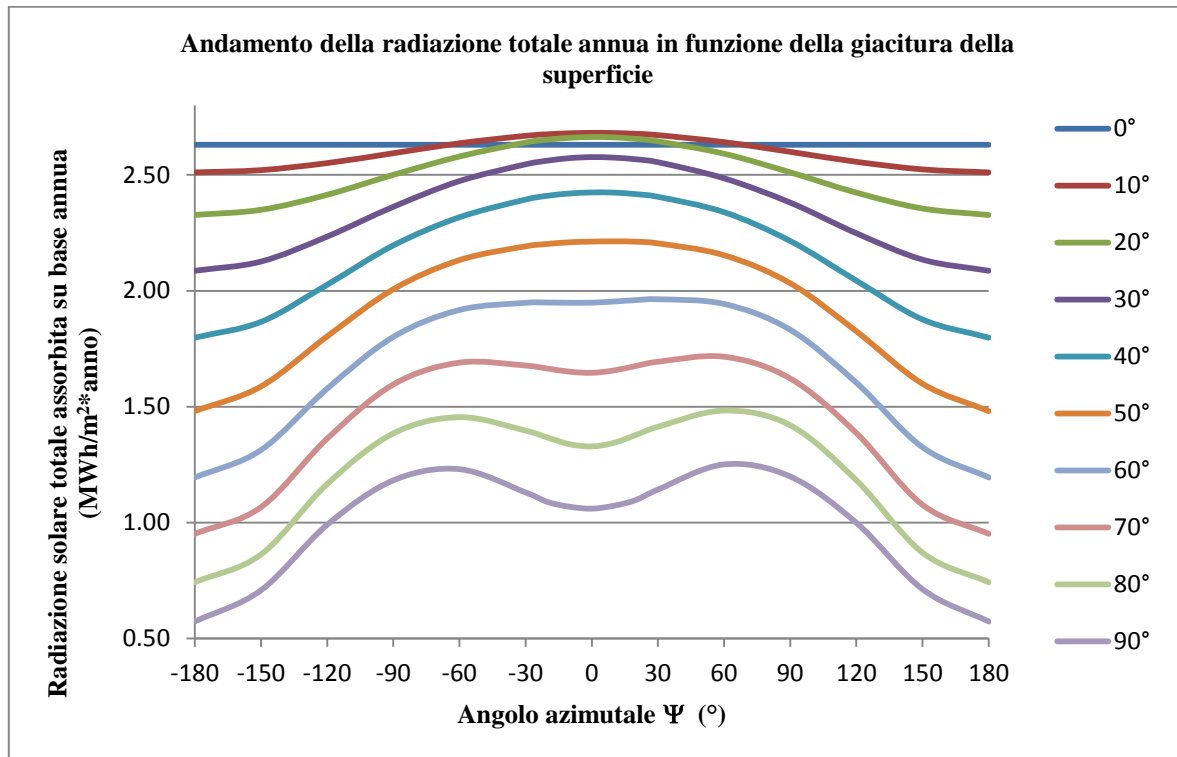



Grafico 5.1 - Andamento della radiazione totale annua in funzione della giacitura della superficie

Dal Grafico 5.1 è possibile trarre le seguenti osservazioni:

- Per una generica superficie orizzontale, angolo di inclinazione 0°, la radiazione solare totale assorbita su base annua è indipendente dall'angolo azimutale. Questo aspetto riguarda prevalentemente la disposizione del reattore ed in particolare della cupola gasometrica della geomembrana. Analizzando il dato radiativo è possibile considerare ottimale la scelta di un digestore tubolare ad asse orizzontale.

- Per angoli di inclinazione relativamente contenuti, la direzione Nord è quella che massimizza la radiazione solare totale assorbita su base annua.
- Per angoli di inclinazioni compresi tra 40° e 60° si evidenzia un trend di appiattimento progressivo della curva, rendendo di fatto l'orientazione di tale superficie pressoché indipendente dall'angolo azimutale entro il range che va da Ovest – Nord-Ovest fino ad Est – Nord-Est.
- Per angoli di inclinazione maggiori di 60° la curva cambia drasticamente aspetto: anziché presentare un unico massimo relativo in corrispondenza del Nord, presenta 2 massimi relativi che gradualmente si consolidano in corrispondenza dell'Ovest e dell'Est. Questo aspetto suggerisce che le superfici verticali o sub-verticali debbano essere orientate preferenzialmente in direzione Est od Ovest. La condizione di ortogonalità tra le pareti della serra, oltre ad agevolare le attività di realizzazione della stessa, consente di ottimizzare il flusso radiativo incidente. Riferendosi alla serie di dati per superfici inclinate di 90°, è altresì possibile osservare come per l'orientazione Nord la curva presenti un minimo relativo in cui la radiazione non si discosta molto dai valori ottimali, mentre per l'orientazione Sud la curva presenta un minimo assoluto, ad indicare la posizione estremamente svantaggiosa. La scelta progettuale di dimensionamento della parete Sud, la più estesa delle pareti della serra, è stata fatta nella consapevolezza che per più di 8 mesi l'anno (da Febbraio ad Ottobre, vedi serie 90° del Grafico 5.2 ed Allegato A2), il Sole descrive un arco in cui la culminazione al mezzogiorno è in corrispondenza del Nord.
- Le curve rappresentate non si intersecano tra loro salvo il caso particolare delle curve relative ad angoli di inclinazione 0°, 10° e 20°. Questo significa che tendenzialmente all'aumentare dell'angolo di inclinazione diminuisce la radiazione solare totale assorbita su base annua. Il fenomeno è smentito per gli angoli di inclinazione sub-orizzontale ed in particolare per quei valori a cavallo della latitudine del sito ($\phi = -13.71$) che rendono l'angolo di incidenza (tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi solari) nullo nel maggior numero di istanti. Dalla analisi del Grafico 5.2 si evince che per una superficie rivolta a Nord ed inclinata di 20°, la radiazione solare totale giornaliera presenta un andamento caratterizzato da variazioni molto contenute, rispetto agli altri angoli di inclinazione sub-orizzontale. È dunque confortante il confronto tra l'inclinazione di progetto della falda della copertura della serra ed i valori teorici ottimali.

Avviando una ottimizzazione con il componente aggiuntivo Risolutore di Excel, è stato possibile ricavare i parametri di giacitura che massimizzano il valore cumulato annuo di radiazione solare incidente su una generica superficie:

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{0.71}°$$
$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{12.77}°$$

$$\boldsymbol{Radiazione\ incidente\ totale\ annua = 2.68\ \frac{MWh}{m^2 \cdot anno}}$$

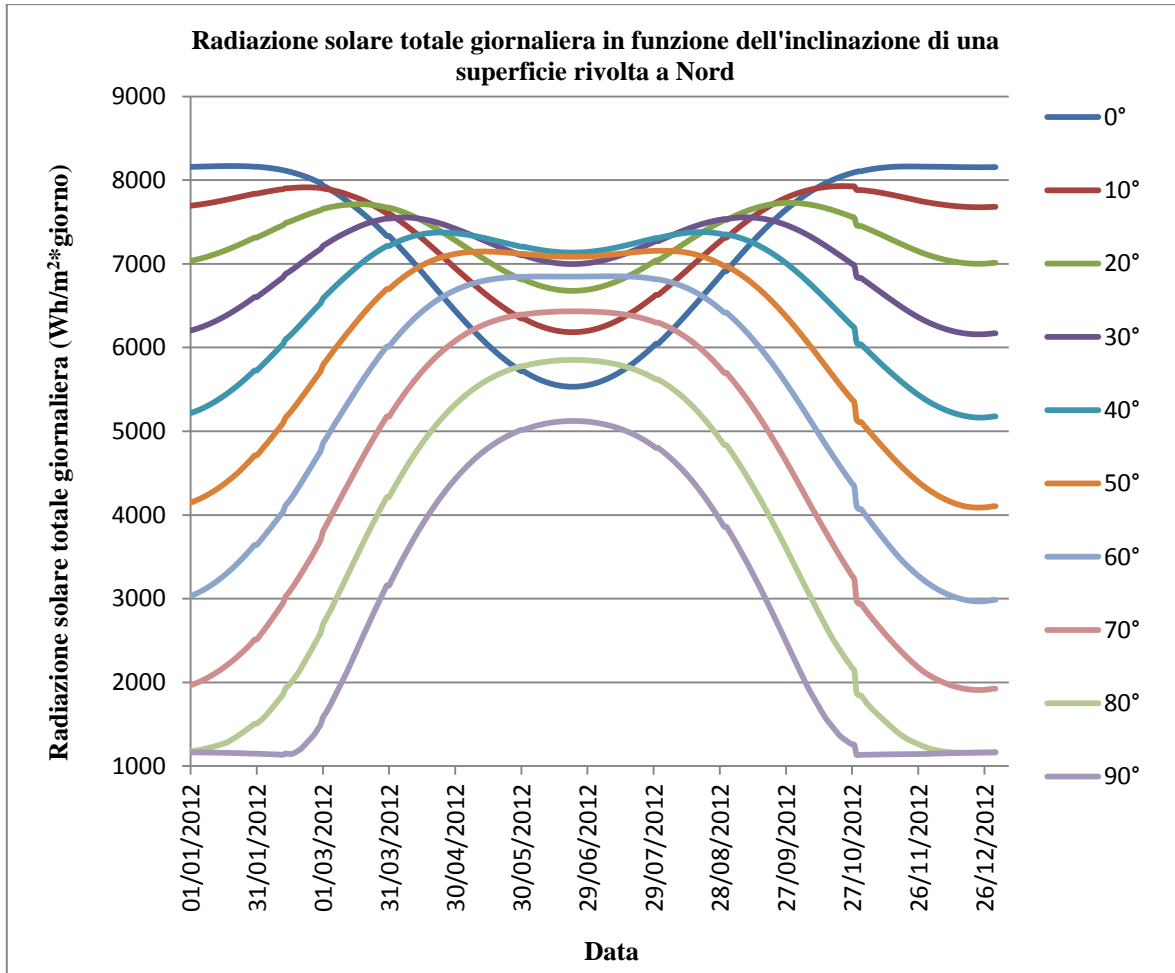



Grafico 5.2 - Radiazione solare totale giornaliera in funzione dell'inclinazione di una superficie rivolta a Nord

Il Grafico 5.2 mostra ancora una volta come le inclinazioni in grado di ricevere i maggiori contributi radiativi corrispondano ai valori più prossimi alla latitudine geografica. Inoltre esso mostra la distribuzione della radiazione solare giornaliera ricevuta durante l'anno da una superficie rivolta a Nord e caratterizzata da un determinato angolo di inclinazione. È confortante osservare come i dati mostrati nel Grafico 5.2 siano in linea con i dati climatici della regione dell'Apurimac riportati nell'Allegato A3.

È facile notare come una superficie verticale riceva meno radiazione durante l'estate australe, poiché in tale stagione il Sole è alto nel cielo; mentre al contrario durante l'inverno australe, quando il Sole è più basso, tali superfici siano maggiormente irraggiate rispetto a quelle orizzontali. È interessante notare come per angoli di inclinazione di circa 45° si ottiene una curva che presenta un plateau che si estende dai primi giorni di Aprile fino agli ultimi giorni di Agosto, in cui la radiazione solare totale assorbita rimane pressoché

costante; inoltre quantitativamente la radiazione massima, raggiunta in corrispondenza del 22 Settembre (equinozio di primavera australe) raggiunge i 7100 Wh/m^2 nel caso di parete inclinata 45°-50°, mentre solamente 5100 Wh/m^2 nel caso di parete verticale. Questo risultato induce a considerare la possibilità di erigere la parete Nord (quella di altezza inferiore) con una pendenza di 45° circa; tuttavia le caratteristiche meccaniche dell'adobe e le evidenti complicazioni pratiche fanno di questo aspetto una considerazione puramente teorica.

5.2. Radiazione solare assorbita dalle diverse superfici costituenti il sistema

Vengono di seguito riportati i grafici di radiazione solare assorbita su base giornaliera per le diverse superfici costituenti il sistema. I giorni presi in esame sono:

- 12 Febbraio: ultimo giorno della stagione estiva australe in cui al mezzogiorno il Sole si trova a Sud;
- 13 Febbraio: primo giorno della stagione estiva australe in cui al mezzogiorno il Sole si trova a Nord;
- 21 Marzo: equinozio di autunno (australe), in cui il dì e la notte hanno pari durata, 12 ore (vedi Grafico 5.7);
- 21 Giugno: solstizio di inverno (australe) giorno in cui la durata del dì raggiunge il suo minimo;
- 22 Settembre: equinozio di primavera (australe);
- 28 Ottobre: ultimo giorno della primavera (australe) in cui il Sole al mezzogiorno si trova a Nord;
- 29 Ottobre: primo giorno della primavera (australe) in cui il Sole al mezzogiorno si trova a Sud;
- 22 Dicembre: solstizio d'estate (australe) giorno in cui la durata del dì raggiunge il suo massimo.

Per ciascune delle suddette date in Allegato A2 è riportato il percorso solare.

Dapprima con il Grafico 5.3 viene riportato l'andamento della radiazione su tutti i giorni presi in esame per tutte le parti del sistema considerate, al fine di mostrare le evidenti differenze, sia in funzione del periodo che della superficie. Successivamente nei grafici a seguire, sono esaminate le date e le superfici singolarmente; rispetto al Grafico 5.3 tuttavia, nei grafici successivi la scala di rappresentazione è stata adattata alle esigenze di interpretabilità.

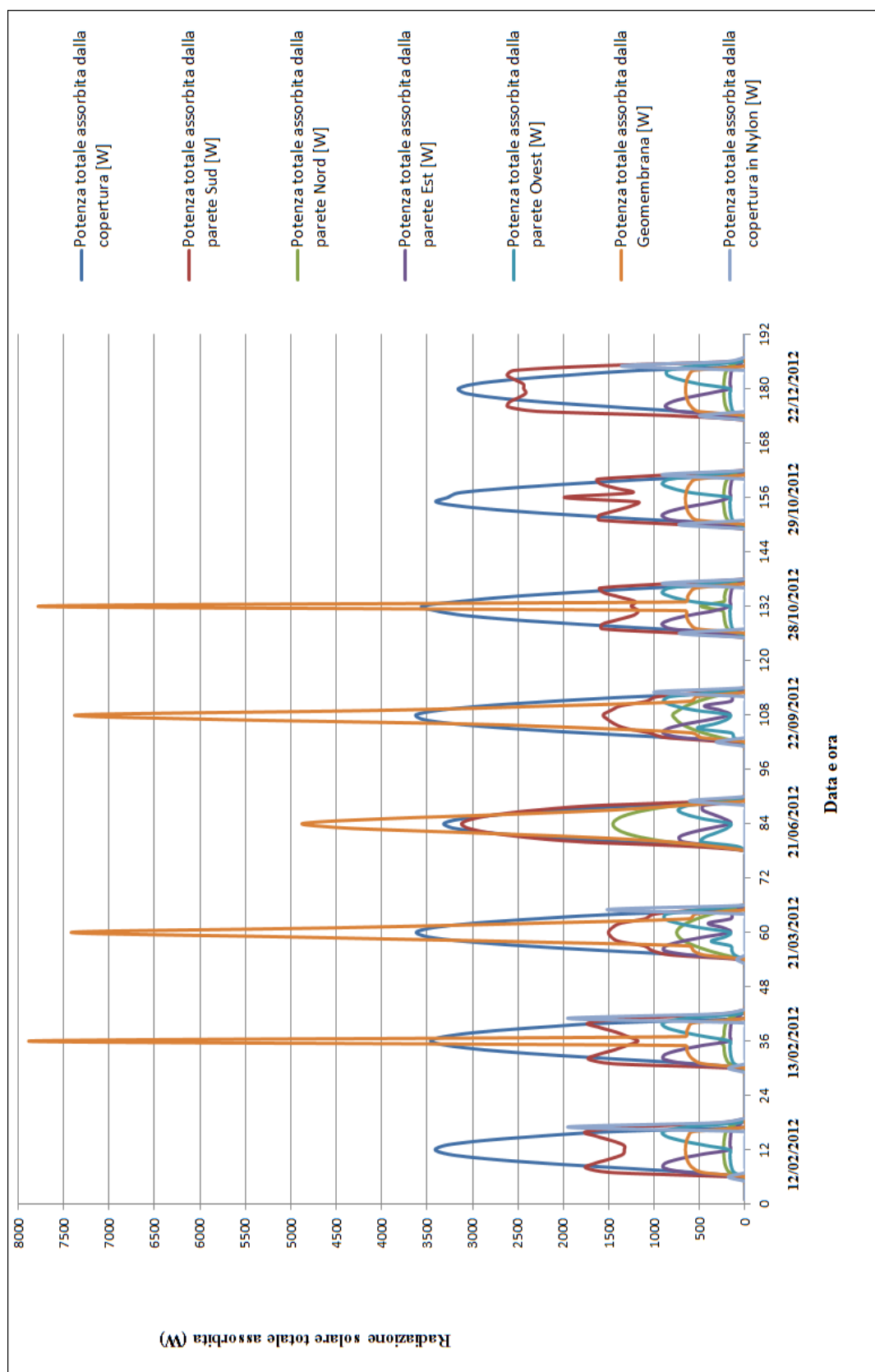



Grafico 5.3 – Andamento della radiazione solare per le diverse parti del sistema nei giorni particolari

- Risulta abbastanza evidente come la copertura in agrofilm riceva la radiazione solare in modo pressoché costante durante il corso dell'anno, dato indicante un corretto posizionamento della copertura stessa; inoltre quantitativamente la radiazione assorbita dalla copertura è dominante rispetto alle altre pareti, fatta eccezione della geomembrana in particolari date ed orari di seguito specificati. Riferendosi anche al Grafico 5.7 si può notare come la radiazione assorbita dalla copertura sia indipendente dalla durate del dì. Facendo inoltre riferimento alla Tabella 4.3, in cui sono riassunte le principali caretteristiche delle superfici, è possibile osservare che nonostante l'agrofilm abbia un coefficiente di assorbimento relativamente basso, data la elevata superficie complessivamente la radiazione assorbita è notevole.

- Per quanto concerne la parete Sud la prima osservazione può essere fatta riguardo la forma della curva: nel periodo dell'anno in cui il Sole culmina verso Sud al mezzogiorno, la curva presenta due massimi relativi all'incirca in corrispondenza delle ore 8 e delle ore 16 rispettivamente, mentre presenta un minimo relativo proprio in corrispondenza delle ore 12. Ciò è dovuto al fatto che in tale periodo dell'anno il Sole culmina con angoli di altezza prossimi a 90°. Al contrario è possibile osservare come nel periodo in cui il Sole culmina verso Nord con altezze di circa 60°, la curva dell'andamento della radiazione assorbita segua un andamento parabolico con un massimo relativo proprio alle ore 12. In questo periodo dell'anno il percorso del Sole è compreso all'interno degli angoli critici indicati nei paragrafi precendenti: il lato della parete Sud interno alla serra ed esposto dunque a Nord, è ben irraggiato. Il 21 Giugno in particolare, la radiazione assorbita dalla parete Sud quasi eguaglia quella assorbita dalla copertuta in agrofilm. Va ricordato che la parete Sud (come anche le parete laterali) può beneficiare di un doppio affaccio e quindi, anche nei periodo di assenza di radiazione diretta su un lato, rimane comunque una componente rilevante di radiazione diffusa. La radiazione diffusa specifica (per unità di superficie) è stata assunta costante ed indipendente dalla giacitura delle pareti; data la notevole estensione della parete Sud rispetto alle altre, tale contributo risulta tutt'altro che trascurabile (vedere Tabella 5.4).

- La radiazione assorbita dalla parete Nord presenta un regolare andamento parabolico durante tutto l'anno. L'entità modesta del valore di radiazione è prevalentemente dovuta al fatto che la superficie della parete è ridotta e inoltre, per le assunzioni fatte, la parete Nord è irraggiata solo sul lato esposto verso l'esterno.

- Le pareti laterali presentano un andamento speculare tra loro e pressoché costante durante l'anno: nelle ore anti meridiane la radiazione assorbita dalla parete Est raggiunge il suo massimo, in quanto è presente la componente diretta. Analogamente questo accade nelle ore post meridiane per la parete Ovest. Dai Grafici 5.4 e 5.5 è possibile notare come nei mesi in cui il Sole culmina a Nord al mezzogiorno, ciascuna parete riceva un contributo aggiuntivo rispettivamente nel pomeriggio per quanto riguarda la parete Est e nella mattina per quanto riguarda la parete Ovest. Ciò è dovuto al fatto che l'effetto di mutuo ombreggiamento tra la parete Est e la parete Ovest è nettamente inferiore rispetto a quello operato dall parete Sud. Infine è importante notare come la radiazione solare assorbita da entrambe raggiunga il suo minimo durante il 21 Giugno, solstizio di inverno australe. La causa di questo comportamento risiede nel fatto che, come si può osservare dal diagramma del percorso solare relativo a quella data, il Sole sorge a 60° Est e tramonta a 60° Ovest, ovvero rimane per tutto il tempo entro gli angoli di vista dell'interno della serra verso l'estero, limitando le componenti incidenti sul lato esterno di entrambe le pareti.

- La radiazione assorbita dalla geomebrana (vedi Grafico 5.3 e Grafico 5.6) è caratterizzata da un netto cambio di comportamento a seconda che il Sole culmini a Nord o a Sud al mezzogiorno. Nel primo caso la radiazione raggiunge dei valori molto elevati sopratutto tra le ore 8 e le ore 16, quando il Sole rimane entro gli angoli di vista dell'interno della serra. Al contrario nel secondo caso, subendo il pesante effetto dell'ombreggiamento operato dalla parete Sud, la geomembrana riceve solamente la quota parte di radiazione solare diffusa. È importante osservare che la componente di radiazione diffusa risulta considerevole in ragione del fatto che la geomembrana (o meglio la cupola del reattore che è esposta alla radiazione) ha una superficie elevata e che, per le ipotesi adottate, le superfici interne alla serra hanno un coefficiente di assorbimento unitario. Nei giorni di transizione del percorso solare (tra esposizione a Nord ed esposizione a Sud) la geomembrana in corrispondenza del mezzogiorno riceve un contributo considerevole di radiazione solare diretta a causa della altezza del Sole che vale circa 90°.

- La potenza assorbita dalla coperta in nylon ha un andamento caratterizzato da 2 picchi in corrispondenza dell'orario in cui viene posizionata ed uno più ingente nell'orario in cui viene rimossa. Questo dato può significare una gestione dell'impianto non ottimizzata, in quanto parte di tale radiazione potrebbe essere assorbito dalle superfici interne alla serra. Tuttavia un giudizio più accurato riguardo tale aspetto richiede una analisi delle perdite di calore del sistema verso l'ambiente, come di seguito esposto.

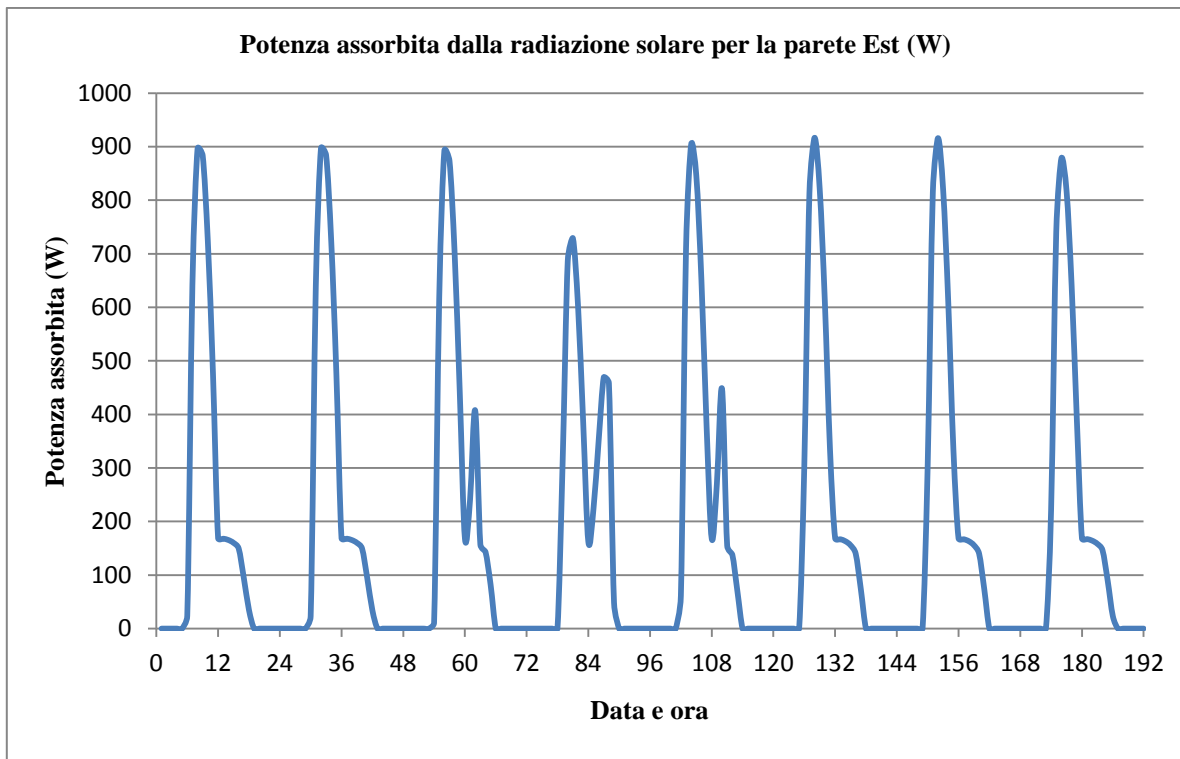



Grafico 5.4 – Potenza assorbita dalla radiazione solare per la parete Est

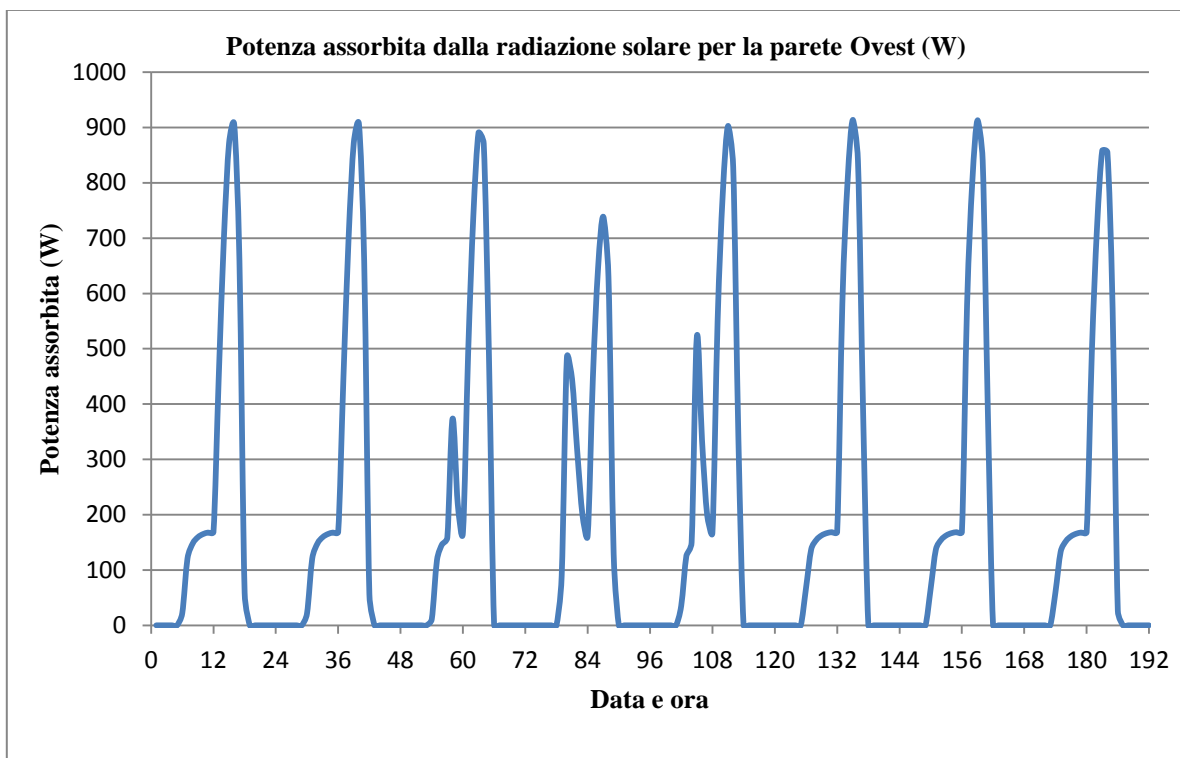



Grafico 5.5 – Potenza assorbita dalla radiazione solare per la parete Ovest

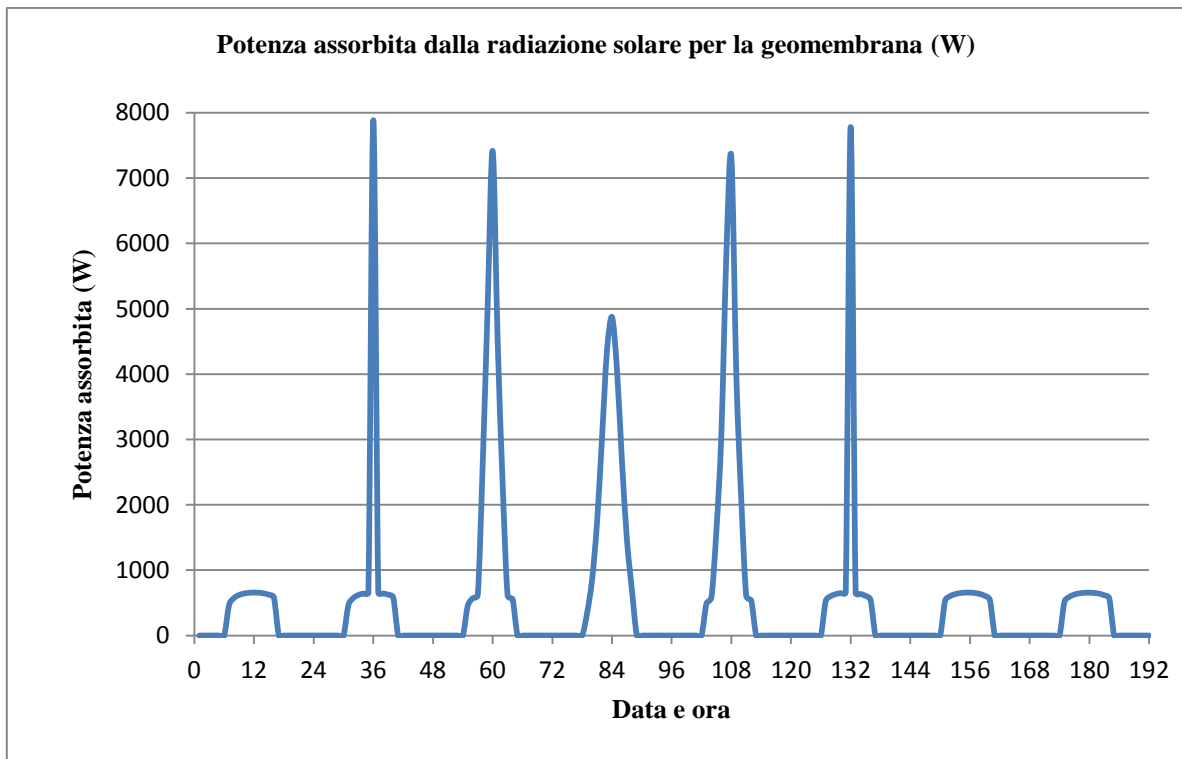



Grafico 5.6 – Potenza assorbita dalla radiazione solare per la geomembrana

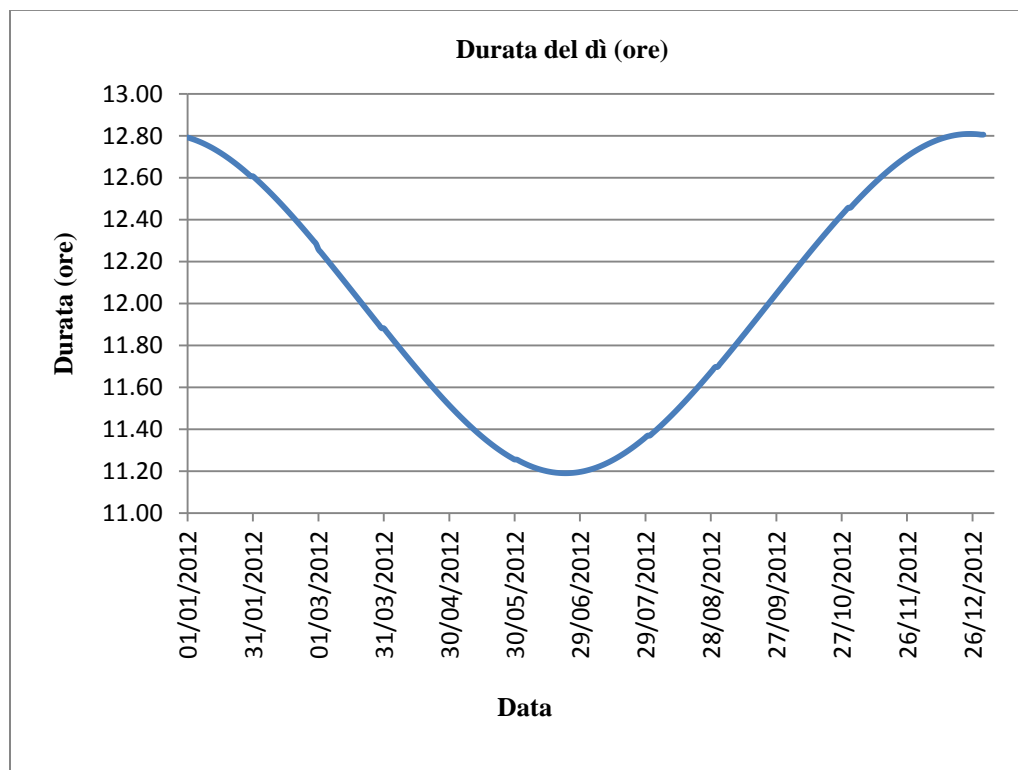



Grafico 5.7 – Durata del dì durante l'anno

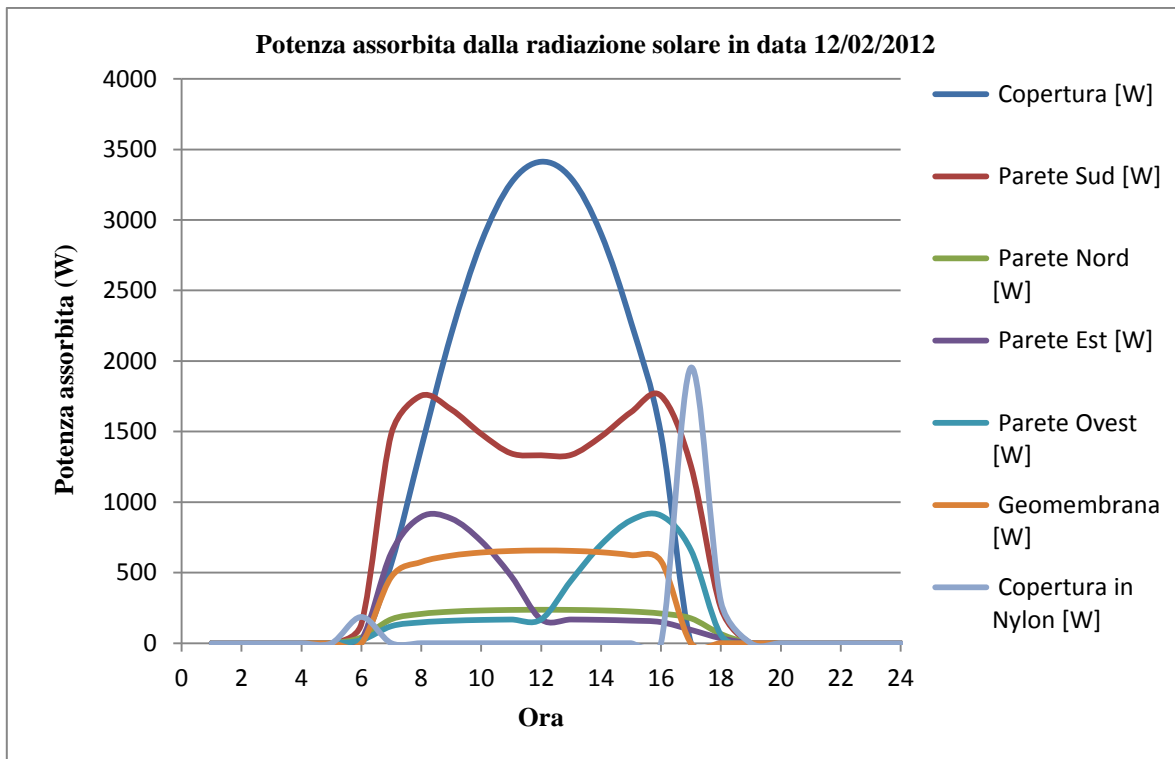



Grafico 5.8 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 12/02/2012

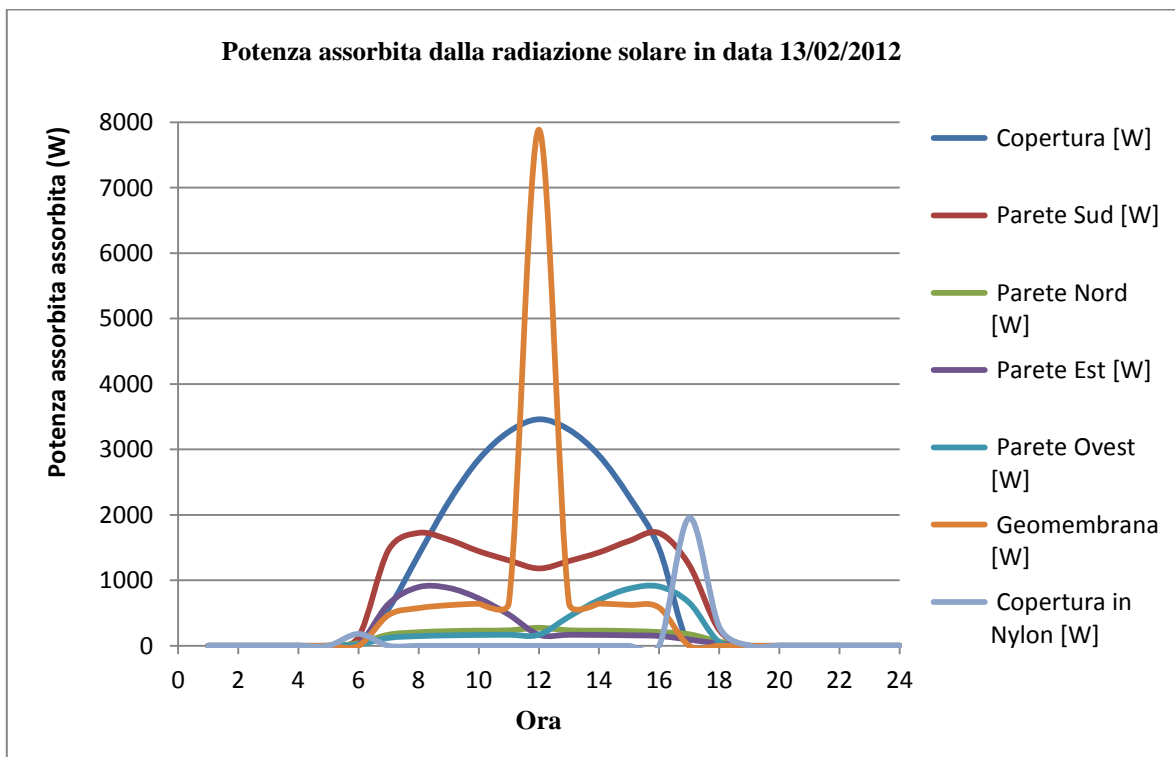



Grafico 5.9 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 13/02/2012

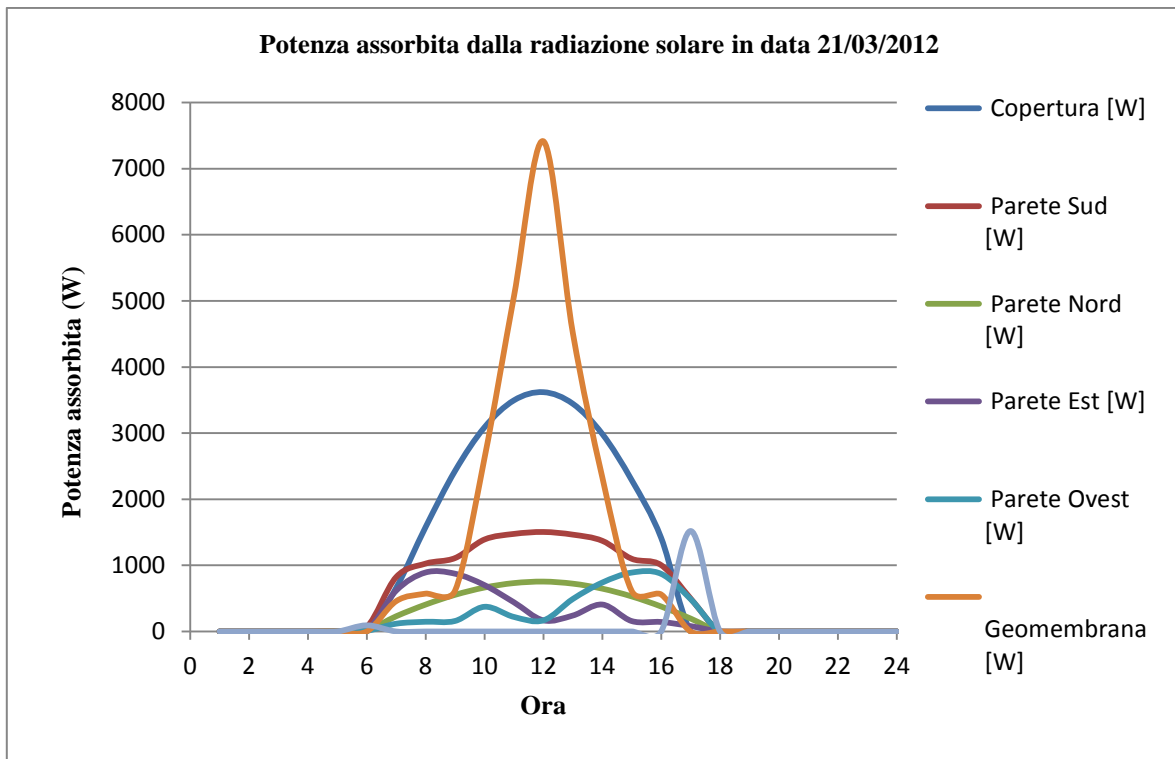



Grafico 5.10 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 21/03/2012

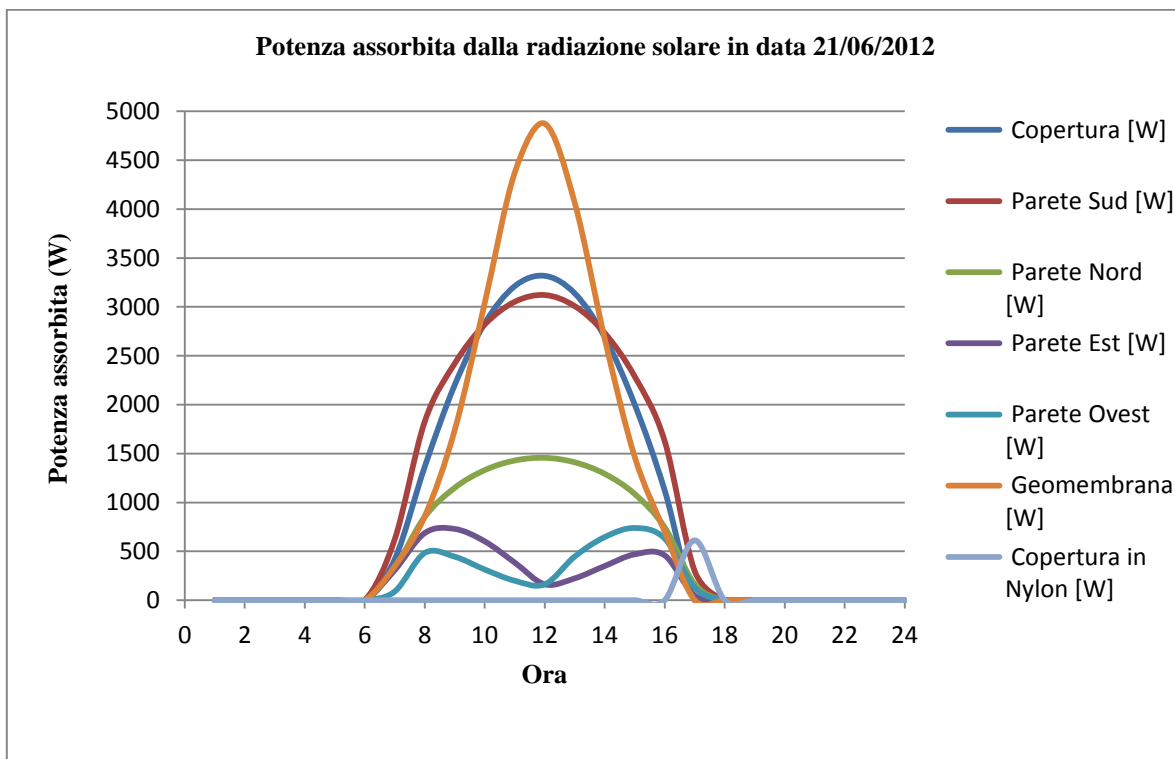



Grafico 5.11 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 21/06/2012

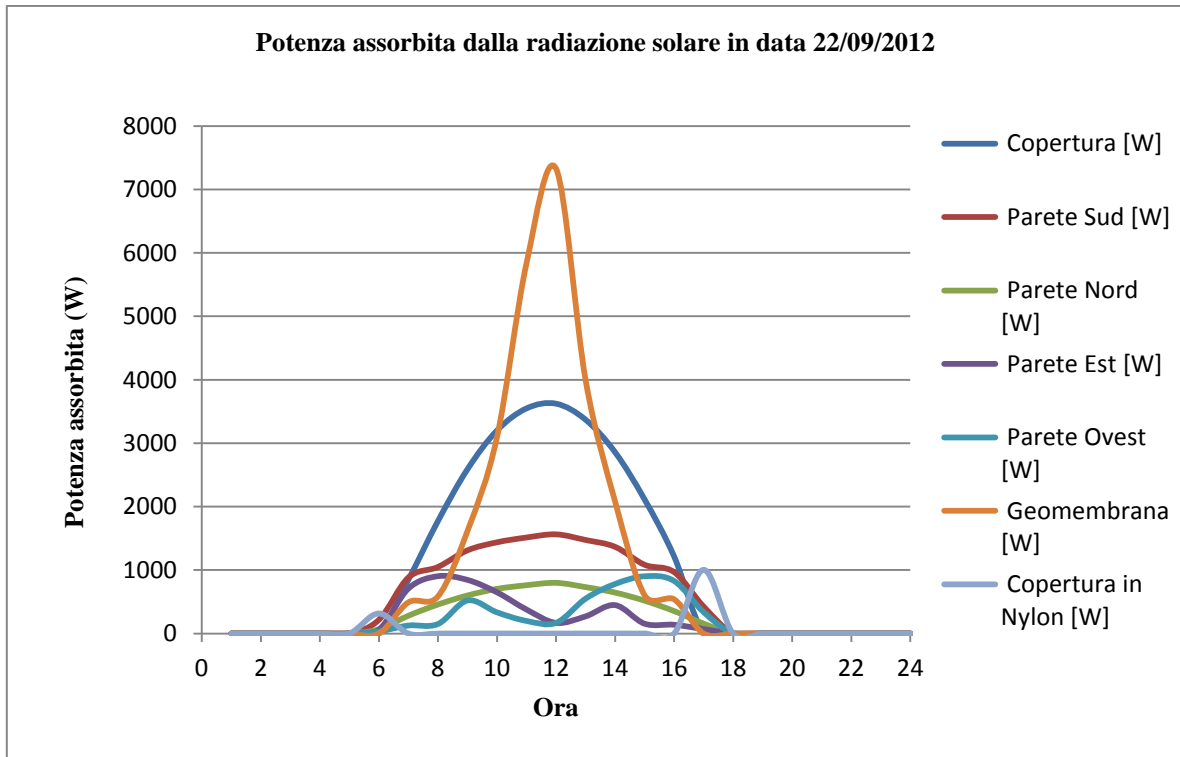



Grafico 12 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 22/09/2012

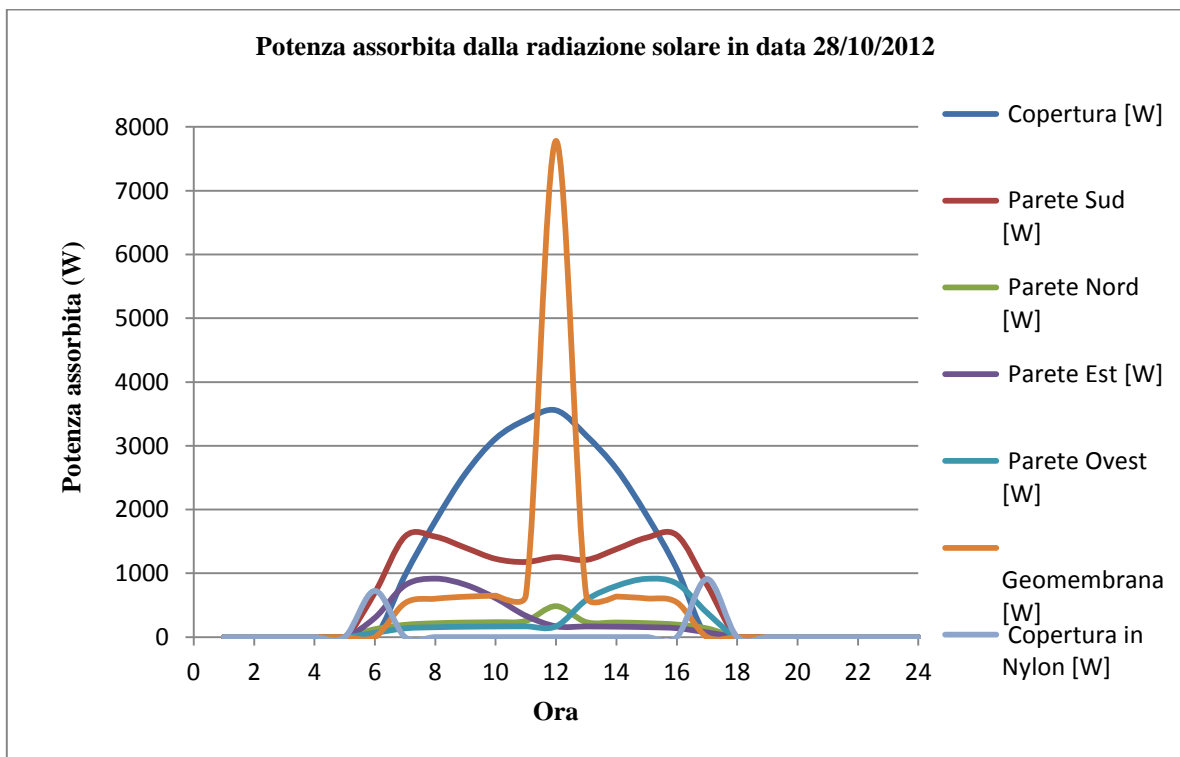



Grafico 5.13 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 28/10/2012

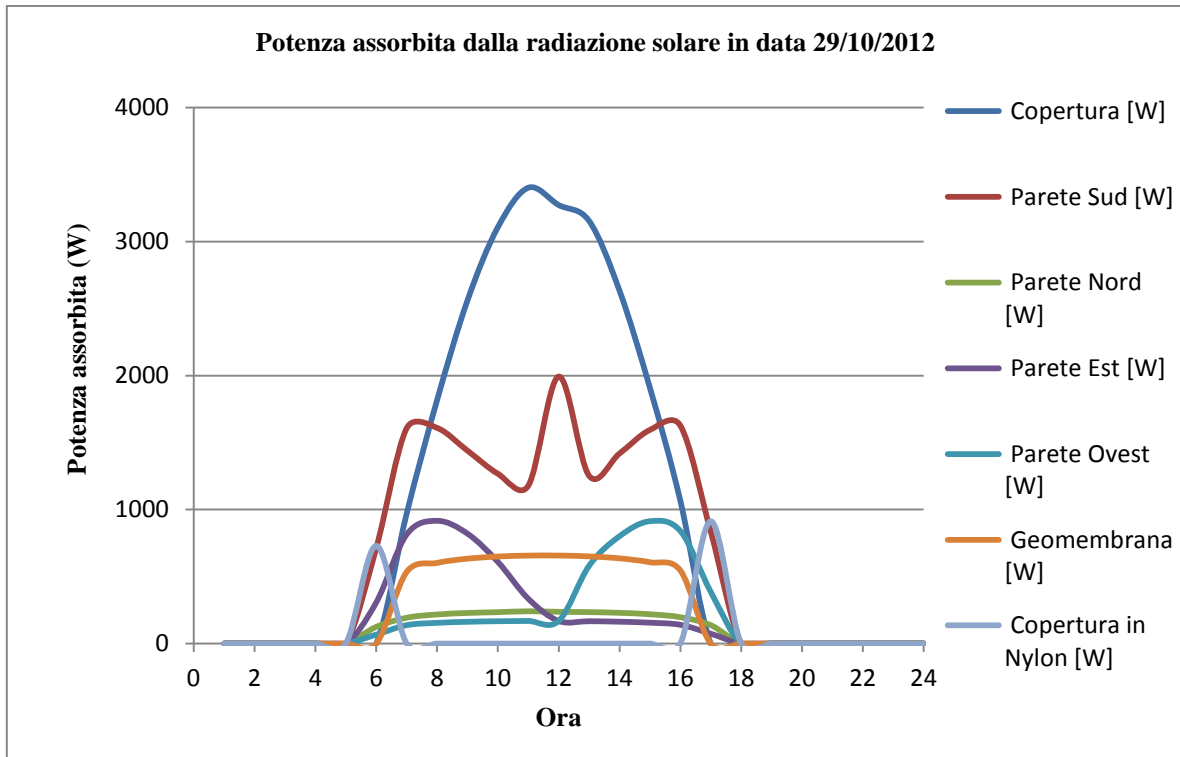



Grafico 5.14 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 29/10/2012

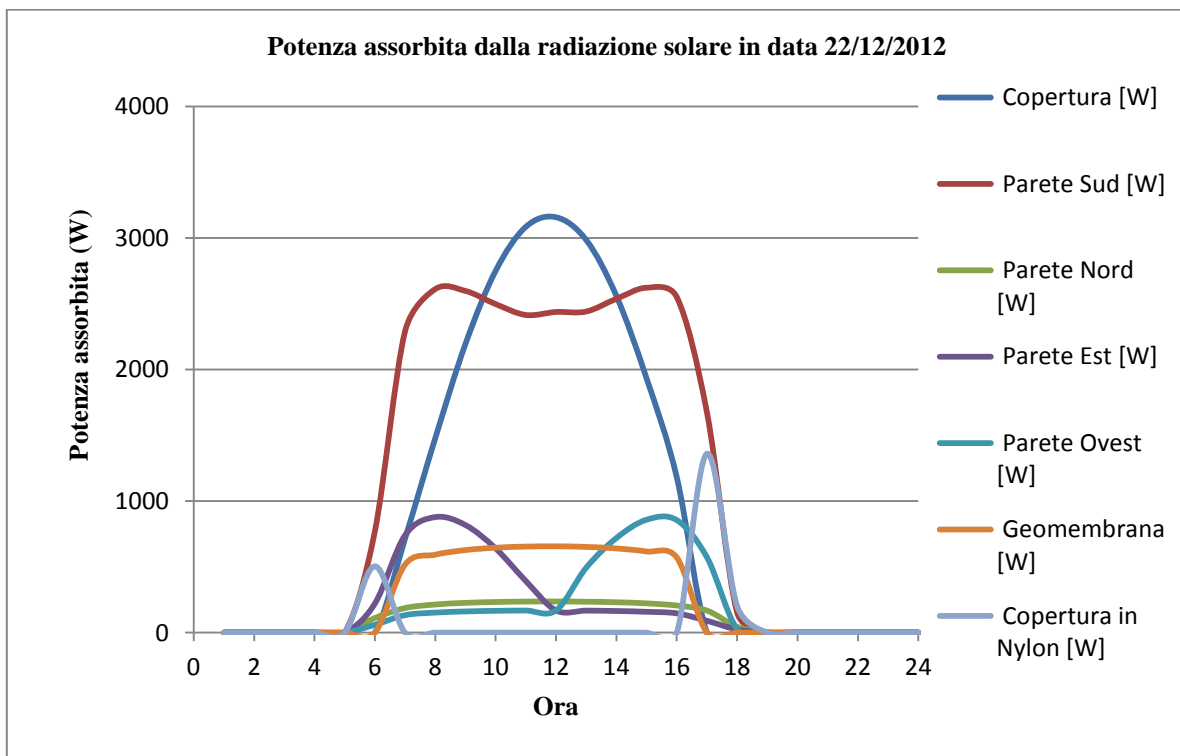



Grafico 5.15 – Potenza assorbita dalla radiazione solare in data 22/12/2012

Tabella 5.1 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla copertura

Mese	*Radiazione solare diretta assorbita sull'esterno della copertura [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della copertura [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla copertura [kWh/mese]*
1	593.30	104.16	697.46
2	592.25	97.03	689.28
3	668.33	102.79	771.12
4	642.38	97.58	739.96
5	626.82	97.96	724.78
6	579.68	92.79	672.47
7	609.33	96.30	705.63
8	647.78	99.23	747.01
9	652.13	99.05	751.18
10	659.07	104.15	763.22
11	593.22	101.30	694.53
12	582.52	104.58	687.10
Totale [MWh/anno]	7.45	1.20	8.64
[%] rispetto al Totale	86.15%	13.85%	

Tabella 5.2 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla parete Nord

Mese	*Radiazione solare diretto assorbita sull'esterno della parete Nord [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della parete Nord [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla parete Nord [kWh/mese]*
1	0.00	78.79	78.79
2	5.29	71.96	77.26
3	87.96	73.59	161.55
4	186.86	68.37	255.23
5	258.85	67.47	326.32
6	272.01	63.91	335.92
7	272.65	66.90	339.55
8	227.48	69.33	296.82
9	133.52	70.66	204.17
10	32.88	76.31	109.20
11	0.00	75.14	75.14
12	0.00	78.73	78.73
Totale [MWh/anno]	1.48	0.86	2.34
[%] rispetto al Totale	63.18%	36.82%	

Tabella 5.3 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla parete Sud

Mese	*Radiazione solare diretta assorbita sull'esterno della parete Sud [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della parete Sud [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'esterno della parete Sud [kWh/mese]*
1	381.52	259.17	640.68
2	122.89	236.71	359.60
3	3.19	242.05	245.24
4	0.00	224.88	224.88
5	0.00	221.92	221.92
6	0.00	210.22	210.22
7	0.00	220.07	220.07
8	0.00	228.07	228.07
9	0.03	232.42	232.44
10	46.36	251.02	297.38
11	289.31	247.15	536.46
12	462.69	258.98	721.67
Totale [MWh/anno]	1.31	2.83	4.14
[%] rispetto all'esterno	31.56%	68.44%	
[%] rispetto al Totale	18.28%	39.65%	

Mese	*Radiazione solare diretta assorbita sull'interno della parete Sud [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'interno della parete Sud [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'interno della parete Sud [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla parete Sud [kWh/mese]*
1	0.00	115.96	115.96	756.65
2	0.43	108.02	108.46	468.06
3	37.25	114.44	151.68	396.92
4	173.03	108.64	281.68	506.56
5	341.16	109.06	450.23	672.15
6	397.85	103.30	501.15	711.37
7	377.07	107.22	484.29	704.35
8	253.42	110.48	363.90	591.97
9	85.47	110.27	195.75	428.19
10	7.88	115.95	123.83	421.22
11	0.00	112.79	112.79	649.25
12	0.00	116.44	116.44	838.11
Totale [MWh/anno]	1.67	1.33	3.01	7.14
[%] rispetto all'interno	55.67%	44.33%		
[%] rispetto al Totale	23.42%	18.65%		

Tabella 5.4 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla parete Est

Mese	*Radiazione solare diretta assorbita sull'esterno della parete Est [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della parete Est [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'esterno della parete Est [kWh/mese]*
1	87.67	42.29	129.97
2	82.95	38.63	121.58
3	86.54	39.50	126.04
4	76.40	36.70	113.09
5	69.11	36.22	105.32
6	61.21	34.31	95.51
7	65.27	35.91	101.19
8	74.50	37.22	111.72
9	80.79	37.93	118.72
10	89.98	40.96	130.94
11	87.89	40.33	128.23
12	88.81	42.26	131.07
Totale [MWh/anno]	0.95	0.46	1.41
[%] rispetto all'esterno	67.29%	32.71%	
[%] rispetto al Totale	54.58%	26.53%	

Mese	*Radiazione solare diretta assorbita sull'interno della parete Est [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'interno della parete Est [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'interno della parete Est [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla parete Est [kWh/mese]*
1	0.00	12.01	12.01	141.98
2	0.18	11.19	11.37	132.94
3	10.98	11.85	22.84	148.88
4	32.96	11.25	44.21	157.30
5	32.46	11.30	43.75	149.07
6	27.73	10.70	38.43	133.94
7	29.26	11.10	40.37	141.55
8	34.33	11.44	45.77	157.50
9	21.86	11.42	33.29	152.01
10	1.40	12.01	13.40	144.34
11	0.00	11.68	11.68	139.91
12	0.00	12.06	12.06	143.13
Totale [MWh/anno]	0.19	0.14	0.33	1.74
[%] rispetto all'interno	58.07%	41.93%		
[%] rispetto al Totale	10.97%	7.92%		

Tabella 5.5 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla parete Ovest

Mese	*Radiazione solare diretto assorbita sull'esterno della parete Ovest [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della parete Ovest [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'esterno della parete Ovest [kWh/mese]*
1	87.59	42.29	129.88
2	83.02	38.63	121.65
3	86.50	39.50	126.00
4	74.78	36.70	111.48
5	65.91	36.22	102.13
6	58.93	34.31	93.24
7	64.23	35.91	100.14
8	73.36	37.22	110.58
9	79.64	37.93	117.57
10	86.84	40.96	127.80
11	84.39	40.33	124.72
12	86.23	42.26	128.50
Totale [MWh/anno]	0.93	0.46	1.39
[%] rispetto all'esterno	66.83%	33.17%	
[%] rispetto al Totale	53.81%	26.71%	

Mese	*Radiazione solare diretto assorbita sull'interno della parete Ovest [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'interno della parete Ovest [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita sull'interno della parete Ovest [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla parete Ovest [kWh/mese]*
1	0.00	12.01	12.01	141.89
2	0.19	11.19	11.38	133.03
3	10.46	11.85	22.31	148.32
4	34.76	11.25	46.02	157.49
5	35.48	11.30	46.77	148.90
6	27.25	10.70	37.95	131.19
7	28.41	11.10	39.51	139.65
8	38.90	11.44	50.34	160.92
9	21.58	11.42	33.00	150.58
10	2.08	12.01	14.09	141.89
11	0.00	11.68	11.68	136.40
12	0.00	12.06	12.06	140.56
Totale [MWh/anno]	0.20	0.14	0.34	1.73
[%] rispetto all'interno	59.06%	40.94%		
[%] rispetto al Totale	11.50%	7.97%		

Tabella 5.6 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla geomembrana

Mese	*Radiazione solare diretto assorbita sull'interno della Geomembrana [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'interno Geomembrana [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla Geomembrana [kWh/mese]*
1	0.00	190.64	190.64
2	133.58	177.59	311.17
3	534.27	188.13	722.40
4	672.63	178.61	851.24
5	637.38	179.30	816.67
6	561.32	169.83	731.15
7	604.70	176.26	780.96
8	680.66	181.63	862.29
9	631.15	181.29	812.43
10	326.72	190.62	517.35
11	0.00	185.42	185.42
12	0.00	191.42	191.42
Totale [MWh/anno]	4.78	2.19	6.97
[%] rispetto al Totale	68.58%	31.42%	

Tabella 5.7 – Radiazione solare assorbita mensilmente dalla copertura in nylon

Mese	*Radiazione solare diretto assorbita sull'esterno della copertura [kWh/mese]*	*Radiazione solare diffusa e riflessa assorbita sull'esterno della copertura [kWh/mese]*	*Radiazione solare totale assorbita dalla copertura in Nylon [kWh/mese]*
1	29.94	45.57	75.52
2	32.94	35.95	68.89
3	27.74	26.03	53.77
4	13.52	17.93	31.45
5	5.55	12.71	18.25
6	5.56	12.06	17.62
7	11.62	15.12	26.73
8	16.13	17.38	33.50
9	13.88	23.94	37.82
10	13.69	34.34	48.03
11	13.37	37.52	50.90
12	17.12	44.03	61.16
Totale [MWh/anno]	0.20	0.32	0.52
[%] rispetto al Totale	38.40%	61.60%	

5.3. Analisi delle diverse forme di assorbimento della radiazione solare durante l'anno

Le Tabelle 5.2 – 5.8 sopra riportate rappresentano la radiazione solare assorbita dalle superfici del sistema, suddivisa nelle due componenti considerate, diretta e diffusa più riflessa, per i diversi mesi dell'anno. Viene anche riportato il valore cumulato annuo. Sono infine indicati in termini percentuali, i pesi relativi della componente diretta e diffusa più riflessa in rapporto alla radiazione totale assorbita dalla superficie. Possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- La copertura in agrofilm riceve più dell'85% della radiazione sottoforma diretta ed in maniera costante durante tutti i mesi dell'anno, confermando quanto prima detto riguardo il buon posizionamento della stessa.

- La parete Nord riceve circa i 2/3 della radiazione per via diretta e il restante 30% circa per via diffusa e riflessa. È marcato in questo caso il diverso andamento in funzione dell'anno della componente diretta della radiazione:

    - Massimo nei mesi dell'autunno australe quando il Sole è rivolto a Nord ed è caratterizzato da angoli di elevazione contenuti, che come anticipato precedentemente favoriscono le superfici verticali;
    - Decrescente bruscamente per i mesi di Settembre, Ottobre, Aprile e Marzo;
    - Completo annullamento nel periodo dal 29 Ottobre fino al 12 Febbraio, poiché il Sole è rivolto a Sud in tale periodo dell'anno.

- Per la parete Sud (come del resto anche per le pareti laterali) sono stati considerati i due differenti lati esposti alla radiazione: quello esterno e quello interno alla serra. Per quanto riguarda il lato esterno, la parete Sud mostra un andamento "speculare", seppur in termini percentuali, rispetto alla parete Nord; circa 2/3 della radiazione assorbiti in forma diffusa e riflessa e solamente 1/3 in forma diretta. Chiaramente vale lo stesso discorso legato alla posizione del Sole durante l'anno. Sul lato interno invece la componente diretta e quella diffusa più riflessa sono più bilanciate. Complessivamente il fenomeno preponderante è la radiazione diffusa più riflessa assorbita all'esterno che contribuisce per circa il 40%, mentre il restante 60% è all'incirca equamente distribuito tra le altre 3 componenti.

- Le pareti laterali sono caratterizzate da un andamento analogo delle componenti di radiazione solare assorbita. Ad eccezione degli inevitabili inconvenienti legati al passaggio del Sole da Nord a Sud durante l'anno, che vanno a limitare la radiazione diretta assorbita sul lato interno, le altre 3 componenti di radiazione (quella diretta sul lato esterno e quella diffusa più riflessa su ambo i lati) non subisco apprezzabili

variazioni durante l'anno. Complessivamente il fenomeno che contribuisce maggiormente, per più del 50%, è la radiazione diretta sul lato esterno.

- La radiazione assorbita dalla geomembrana è per il 68% costituita dalla componente diretta, mentre il restante 32% circa in forma diffusa e riflessa. L'andamento è del tutto analogo a quello della parete Nord. Questo è dovuto al fatto che nonostante la geomembrana sia una superficie disposta orizzontalmente, ha una direzione preferenziale di captazione della radiazione, ovvero il Nord. La parete Sud infatti crea un ombreggiamento tale da impedire ai raggi solari di penetrare all'interno della serra, e quindi raggiungere la geomembrana (di cui è costituita la cupola del gasometrica del reattore emergente dal piano campagna).

5.4. Analisi della calibrazione del modello

Sono di seguito riportati e commentati i grafici ottenuti rappresentando, a valle della calibrazione, le temperature misurate dal sensore e quelle calcolate mediante il modello termico implementato. A continuazione la Tabella 5.8 recante il valori numerici dei coefficienti di scambio termico.

La calibrazione del modello è stata effettuata a partire dalle registrazioni di dati di temperature (tramite la strumentazione descritta nei paragrafi precedenti) riferiti al periodo tra il 16/07/2012 ed il 22/07/2012. La serie di misure si estendeva fino al 4/10/2012. Per alcuni giorni di tale periodo si disponeva di dati di produzione di biogas. Solamente nel periodo dal 16 al 22 Luglio tuttavia, la produzione seguiva un andamento costante e prossimo al metro cubo di progetto. Per tale ragione si è deciso di non estendere l'analisi agli altri periodi, in modo da valutare le prestazioni dell'impianto durante un funzionamento il più possibilie rappresentativo del comportamento a regime.

Le temperature misurate sono:

- Temperatura dell'aria ambiente: impiegata come forzante esterna e per calcolare la temperatura di bulbo umido, considerata essere la temperatura dell'ingestato;
- Temperatura dell'aria interna alla serra;
- Temperatura dello slurry contenuto nel reattore (calcolato come media aritmetica delle misure effettuate a 2 distinte profondità di immersione del sensore all'interno del reattore).

Le temperature rispettivamente dell'aria interna alla serra e dello slurry sono state utilizzate per la calibrazione del modello.

Tabella 5.8 – Coefficienti di scambio termico ottenuti in fase di calibrazione

$h_{V\text{-}C}$ [W/m²*K]	$h_{A\text{-}C}$ [W/m²*K]	$h_{V\text{-}pareti}$ [W/m²*K]	$h_{V\text{-}G}$ [W/m²*K]	$h_{A\text{-}pareti}$ [W/m²*K]	$h_{G\text{-}SL}$ [W/m²*K]	$h_{C\text{-}NY}$ [W/m²*K]	$h_{A\text{-}NY}$ [W/m²*K]	ΔU^0 [MJ/kg]	$U_{SU\text{-}SL}$ [W/m²*K]
1	**1**	**1**	**103.56**	**110.27**	**6.67**	**29.55**	**130.83**	**1.49**	**1.73**

É interessante notare come vi sia una differenza di due ordini di grandezza tra il valore dei coefficienti di scambio termico per convezione interni alla serra (rispettivamente $h_{V\text{-}pareti}$ per le pareti e $h_{V\text{-}G}$ per la geomebrana) e quelli tra le superfici esterne e l'aria ambiente (rispettivamente $h_{A\text{-}pareti}$ per le pareti della serra e $h_{A\text{-}NY}$ per la coperta di nylon). La motivazione potrebbe risiedere nel fatto che all'esterno l'ipotesi di convezione naturale viene meno a causa delle correnti ventose, trascurate in prima approssimazione in quanto non si dispone di dati sito-specifici. Come è possibile notare dai dati della stazione meteo di Chuquibambilla, riportata in Allegato A3, la velocità media giornaliera del vento durante il periodo di studio è sempre superiore a 5 km/h.

Fa eccezione a tale comportamento il coefficiente di scambio termico convettivo dell'agrofilm con l'aria ambiente, $h_{A\text{-}C}$.

Il coefficiente di scambio termico globale tra il suolo e lo slurry $U_{SU\text{-}SL}$ è maggiore rispetto al valore calcolato nella ipotesi che il fenomeno fosse regolato solamente da meccanismi di tipo conduttivo. La differenza può essere imputata sia a errori del modello che vengono compensati con questo termine, sia all'infiltrazione d'acqua tra sacca e polistirene, che cambia sostanzialmente la conduttivita' del mezzo. Inoltre, è stata trascurata la variazione di temperatura del terreno nell'immediata vicinanza della sacca.

Il coefficiente di scambio termico tra la copertura in agrofilm e la coperta in nylon $h_{C\text{-}NY}$ assume un valore relativamente elevato: ciò potrebbe essere causato dalla presenza di uno strato di condensa che si crea superficialmente in ragione del forte sbalzo termico tra interno ed esterno della serra nelle ore notturne.

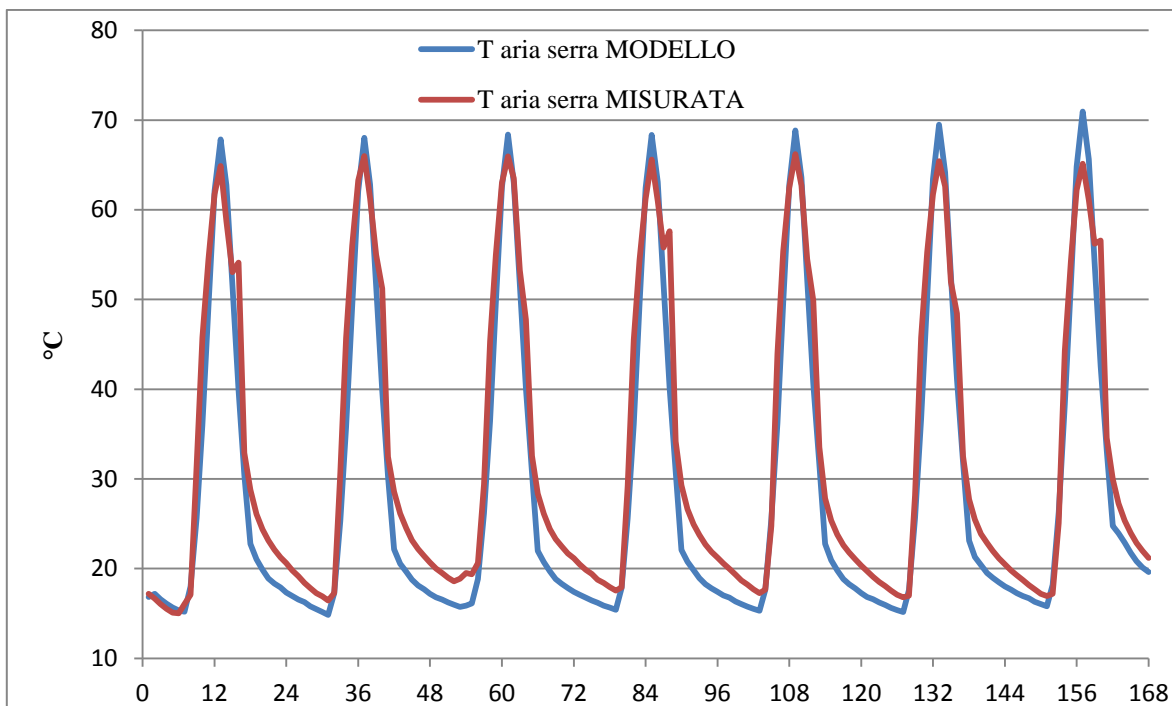



Grafico 5.16 – Calibrazione della temperatura dell'aria interna alla serra

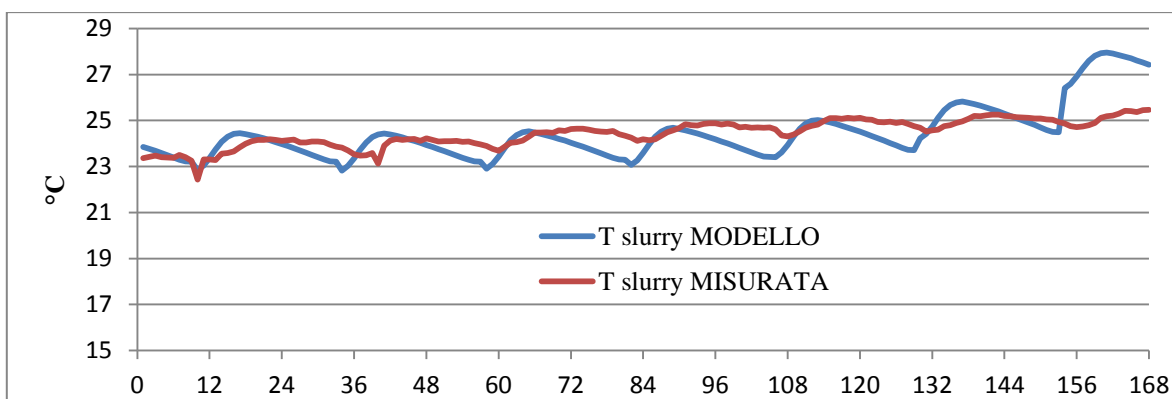



Grafico 5.17 – Calibrazione della temperatura dello slurry contenuto nel reattore

Dal Grafico 5.16 emerge il soddisfacente esito della calibrazione del modello nei confronti della temperatura dell'aria interna alla serra. I periodi di massimo scostamento e quindi peggior adattamento del modello alla realtà si verificano nelle ore del tardo pomeriggio e nella notte, corrispondenti al periodo in cui la coperta di nylon è installata, ed in corrispondenza del mezzogiorno. Tale sovrastima/sottostima della temperatura dell'aria interna da parte del modello è principalmente dovuta alla schematizzazione a parametri concentrati delle pareti perimetrali della serra: è come se si fosse trascurato l'isolamento termico offerto dagli adobes.

Al contrario il Grafico 5.17 manifesta un andamento della temperatura dello slurry calcolata col modello che si discosta dal profilo di temperatura misurato. In particolare le oscillazioni sono più ampie e i punti di minimo e di massimo relativo sono sfasati temporalmente: vengono tendenzialmente anticipati. La spiegazione di tale risultato risiede nel fatto che nel bilancio energetico dello slurry si tiene implicitamente conto della transizione di fase acqua-vapore e dell'effetto globale della reazione chimica. Non è possibile cogliere puntualmente l'effetto della reazione chimica poiché sarebbe necessario esplicitare la variazione del contenuto entalpico di reazione che non conosciamo. Comunque il risultato ottenuto (con una grossolana calibrazione di ΔU^0), mostra che l'ipotesi di produzione di biogas costante durante tutto il giorno non è realistica, lo si vede chiaramente dal confronto tra i profili di temperatura quotidiani dello slurry calcolati e misurati. Il Grafico 5.17 evidenza che il modello utilizzato per lo slurry è molto grossolano:

- non tiene conto dell'evoluzione dei solidi in sospensione;
- ipotizza produzione di biogas costante nel tempo e indipendente dalla temperatura;
- non tiene conto dell'effetto termico delle reazioni batteriche.

Lo sfalsamento temporale non è costante, potrebbe quindi essere che l'introduzione dell'ingestato e lo spurgo del reattore nei giorni considerati non sia avvenuto puntualmente alle ore 9 come invece è stato assunto per il modello.

5.5. Temperature degli elementi del digestore

Il Grafico 5.18 mostra l'andamento delle temperature medie orarie dei diversi elementi costituenti il sistema, nei giorni appartenenti al periodo della calibrazione del modello. Il risultato della calibrazione è in accordo con quella che è la fisica del problema. Le pareti della serra ricalcano l'andamento della temperatura ambiente. L'aria interna alla serra e la geomembrana hanno praticamente sempre la stessa temperatura ed in entrambi i casi l'oscillazione giornaliera è molto ampia a causa della scarsa inerzia termica. Lo stesso vale per la copertura anche se numericamente la sua temperatura è inferiore a quella dell'aria interna, a causa del raffreddamento indotto dal contatto con l'aria esterna. Il fatto che le ampiezze d'oscillazione delle temperature delle pareti siano più contenute di quella dell'aria è indice della maggiore inerzia termica di questi elementi. Geomembrana e copertura non hanno una gran inerzia termica e quindi seguono meglio il comportamento dell'aria. Il ritardo di circa un'ora con cui la temperatura delle pareti raggiunge il picco, rispetto alla temperatura dei suddetti elementi, che si verifica invece puntualmente al mezzogiorno, è indice della combinazione dei meccanismi di scambio termico.

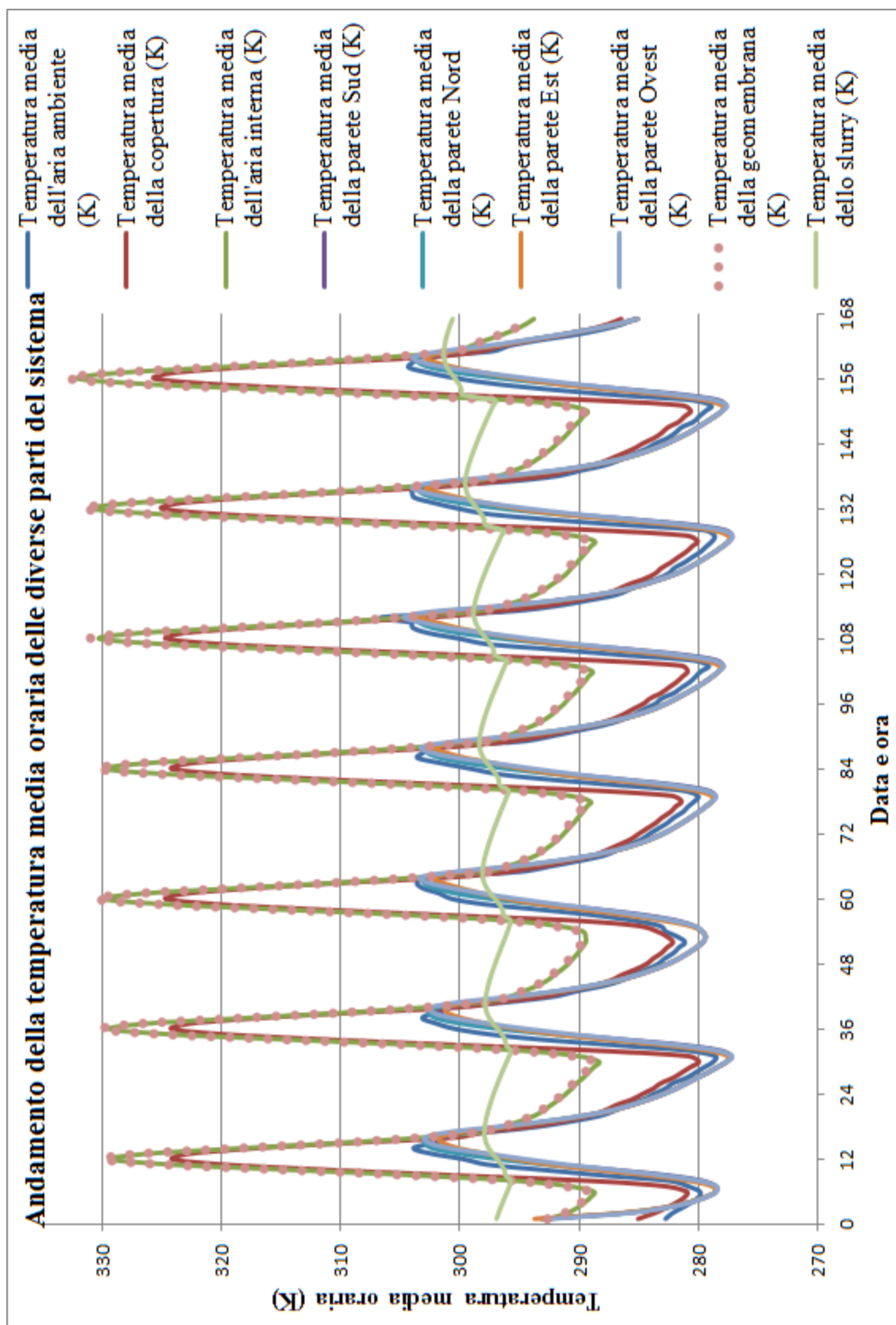



Grafico 5.18 – Andamento delle temperature delle superfici del sistema nel periodo di analisi

5.6. Proposte di miglioramento

Di seguito vengono elencate alcune proposte di miglioramento del modello che potrebbero essere implementate solo a valle del raggiungimento di una più accurata calibrazione dello stesso, basandosi su una maggior mole di dati sito-specifici.

5.6.1. Ottimizzazione dei parametri costruttivi e gestionali

Lo scopo principale dell'implementazione del modello termico è quello di fornire un valido strumento di supporto per una corretta progettazione di impianti semplificati di digestione anaerobica di tipo PTD. Il modello potrebbe essere anche impiegato in fase di verifica delle prestazioni di un impianto esistente.

Le domande a cui ci si propone di poter rispondere, sono le seguenti:

- L'impianto è ben orientato?
- L'impianto è dimensionato bene?
- L'impianto è gestito bene?

Per poter rispondere a queste domande è stato necessario individuare un insieme di parametri in funzione dei quali si potesse implementare il modello termico nel suo complesso, e che quindi potessero essere oggetto di ottimizzazione imponendo opportuni vincoli.

- Parametri costruttivi/realizzativi:
    - Angolo azimutale della copertura della serra:

$$-180° < \Psi_C < +180°$$

    - Angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della copertura della serra:

$$0° < \alpha_C < 90°$$

    - Emersione della cupola gasometrica rispetto al piano campagna (in metri):

$$0.3 < Y_{min} < Y < Y_{max} = 0.4$$

    - Parametro di forma del digestore:

$$5 < \eta_{dig} = \frac{L_{dig}}{d_{dig}} < 10$$

- Parametri gestionali:
  - Ora in cui viene alimentato l'ingestato all'interno del reattore $\boldsymbol{t_{ING}}$;
  - Ora in cui viene posizionata la coperta di nylon a protezione dell'agrofilm e per minimizzare le dispersioni di calore attraverso il tetto $\boldsymbol{t_{NY_up}}$;
  - Ora in cui viene rimossa la coperta di nylon $\boldsymbol{t_{NY_down}}$

I suddetti parametri vengono fatti variare, mentre alcuni parametri sono considerati costanti:

- L'altezza della parete inferiore $h_1 = h_{Nord}$, nel nostro caso denominata parete Nord, è stata fissata pari a 35 cm poiché si è ritenuto ragionevole prevedere un minimo sollevamento della copertura della serra rispetto al piano campagna, per una serie di motivazioni:
  - Riparare l'agrofilm e successivamente la geomembrana in PVC dal rischio di danneggiamento legato al trasporto di polveri e materiale abrasivo con le correnti ventose, spesso sottoforma di raffica, che sono presenti durante tutto l'anno.
  - Creare una barriera fisica a protezione dell'impianto da eventuali animali da compagnia.
  - Protezione da e per le persone che abitualmente popolano l'appezzamento di terreno in cui è situato l'impianto, i quali nelle loro attività potrebbero danneggiare la struttura oppure (in funzione della altezza) rimanerne intrappolati all'interno (la profondità della serra è infatti di circa 1 metro e potrebbe essere difficile riemergere per un infante).

  Tale valore rappresenta un compromesso con le esigenze di mantenimento di un certo angolo di inclinazione della copertura e conseguentemente il risparmio economico legato ad un minor impiego di materiale e tempo per la fabbricazione del mattoni in terra cruda: a parità di angolo di inclinazione, anche per ridotte variazioni dell'altezza della parete inferiore, si avrebbero notevoli aumenti della superficie laterale della serra.

- L'angolo di inclinazione della pareti della serra α_P è stato considerato costante e pari a 15° rispetto alla verticale, per motivi strutturali.

Il modello così implementato offrirebbe la possibilità di dimensionare in modo ottimale un digestore anaerobico semplificato in materiale plastico, con flusso a pistone e inserito in una struttura a serra, solamente in funzione di:

- Coordinate geografiche del sito $(\phi; \lambda)$ da cui dipenderebbe la giacitura della copertura della serra e conseguentemente l'orientazione della serra nella sua globalità, considerando le pareti laterali ortogonali tra loro;

$$(\boldsymbol{\phi}; \boldsymbol{\lambda}) \rightarrow (\boldsymbol{\Psi}; \boldsymbol{\beta})_{Sole} \rightarrow (\boldsymbol{\Psi}_C; \boldsymbol{\alpha}_C) \rightarrow (\boldsymbol{\Psi}_i; \boldsymbol{\alpha}_i)$$

- Serie storica di temperatura ambiente T_{amb}, la quale costituisce, assieme alla radiazione solare incidente sulla superficie i-esima $I_{t,T}(\phi)_i$ ed alla climatologia del sito, una forzante del modello;

$$\boldsymbol{T_i = f\left(T_{amb}; I_{t,T}(\phi)_i\right)}$$

- Volumetria del digestore dimensionata precedentemente in funzione della disponibilità di reflui zootecnici e/o delle necessità energetiche del nucleo familiare, da cui potrebbero essere derivati tutti i parametri di dimensionamento sia del reattore che della serra: diametro del digestore d_{dig} , lunghezza del digestore L_{dig} , larghezza della serra W e altezza della parete maggiore $h_2 = h_{Sud}$, nel caso in esame denominata anche parete Sud.

$$\boldsymbol{V_{dig} = \pi \cdot \left(\frac{d_{dig}}{2}\right)^2 \cdot L_{dig} = \pi \cdot \eta_{dig} \cdot \frac{\left(d_{dig}\right)^3}{2}}$$

$$\boldsymbol{d_{dig} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{dig}}{\pi \cdot \eta_{dig}}}}$$

$$\boldsymbol{L_{dig} = \eta_{dig} \cdot d_{dig}}$$

$$\boldsymbol{p = d_{dig} + \delta_{isol} - Y}$$

$$\boldsymbol{W = d_{dig} + 2 \cdot \left[\delta_{isol} + \Delta + \left(p - \frac{d_{dig}}{2}\right) \cdot \sin(\alpha_P)\right]}$$

$$\boldsymbol{h_2 = h_{Sud} = h_1 + W \cdot \tan(\alpha_C)}$$

Teoricamente quindi, in qualsiasi luogo geografico e per qualsiasi condizione climatica, sarebbe possibile determinare il design ottimale dell’impianto, volto a massimizzare la temperatura mantenuta dallo slurry contenuto nel reattore e quindi favorire le cinetiche di degradazione biologica operate da un consorzio di batteri.

5.6.2. Analisi delle perdite di calore dal sistema verso l'ambiente esterno

Quantificare le perdite di calore dal sistema verso l'ambiente durante il corso dell'anno avrebbe una importanza strategica nell'ottica di ottimizzare la gestione dell'impianto, per esempio calcolando il momento più opportuno per posizionare e rimuovere la coperta di nylon. Sarebbe altresì importante l'analisi di dettaglio dei singoli contributi di dissipazione del calore, per ciscuna delle forme di trasmissione coinvolte:

- Conduzione con il suolo;
- Convezione forzata con l'aria ambiente;
- Irraggiamento del lato esterno delle superfici della serra.

In questo modo si potrebbe ottimizzare il materiale isolante impiegato ed eventualmente considerare l'opportunità di estendere la copertura in nylon anche alle pareti stesse.

5.6.3. Modifiche del disegno e dello schema di impianto

Oltre alla analisi dello stato di fatto, come precedentemente descritto questo studio si prefigge di suggerire ed analizzare la possibilità di implementazione di scenari alternativi. Di seguito vengono riportati 2 diverse tipologie di soluzione impiantistica applicabile.

1. Implementazione di un sistema di tubazioni in PVC all'interno della serra, dimensionati al fine di alimentarvi quotidianamente l'ingestato per una fase di pre-riscaldo della miscela (sterco suino con acqua di lavaggio, in rapporto 1:3). Tale materiale dovrà essere successivamente introdotto all'interno del reattore PTD (plastic tubular digester con schema di funzionamento plug-flow) ad un orario opportunamente scelto in funzione della massima temperatura raggiungibile all'interno dei tubi e delle tempistiche delle reazioni biologiche, al fine di garantire ed incrementare la produzione giornaliera di biogas dell'impianto. Sarà possibile valutare tale scenario al variare del numero di tubi installati. Da tale numero dipendono infatti diversi parametri, tra cui:
   a. Fattori di vista tra le superfici interne alla serra;
   b. Fattori di ombra sulle medesime;
   c. Superficie laterale coinvolta nello scambio di calore convettivo con l'ingestato e l'aria interna alla serra, in cui i tubi sono immersi;
   d. Superficie esposta alla radiazione solare, in grado di assorbire e poi irraggiare energia termica.

   Altri possibili parametri modificabili riguardano la geometria dei tubi. Inizialmente si considerano tubi di lunghezza pari alla longitudine interna della serra, e con uno spessore di 3 mm per andare incontro agli standard commerciali.

2. Installazione di un sistema di 2 serbatoi in materiale metallico (meglio se ferroso, in modo tale che in caso di cessione di impurità, esse possano contribuire al sequestro di idrogeno solforato una volta introdotte insieme all'ingestato all'interno del reattore), scelti in funzione delle proprietà termiche, dimensionati per contenere ciascuno il volume di ingestato da alimentare giornalmente al reattore. La miscela sterco/acqua di lavaggio verrà mantenuta all'interno di tali serbatoi per un HRT pari a 2 giorni. Teoricamente, in tale periodo, il materiale andrà incontro ad una fase di pre-fermentazione operata in un range di temperatura ai limiti della termofilia. Successivamente, le reazioni di acetogenesi e metanogenesi, si svolgeranno all'interno del reattore primario, durante l'HRT di progetto (che è di circa 60 giorni). I serbatoi/reattori saranno installati sulla sommità della parete Sud, quella ad elevazione maggiore; saranno disposti in serie e alimentati alternatamente, in modo tale che il contenuto di entrambi abbia un HRT di 2 giorni e che diariamente vi sia la possibilità di svuotare il contenuto di uno dei due serbatoi, all'interno del reattore tubolare. Secondo questa gestione, l'impianto continuerebbe a funzionare con lo stesso OLR (organic load rate). Si vuole anche valutare la possibilità di installare dei sistemi di agitazione di tipo manuale dei serbatoi, in modo da evitare fenomeni di sedimentazione, e quindi favorire il contatto tra batteri idrolitici e macro molecole.

In entrambi gli scenari alternativi, il risultato atteso è un miglioramento delle cinetiche della fase iniziale di idrolisi, ritenuta come limitante. L'idrolisi ad alta temperatura dovrebbe fornire un substrato più facilmente degradabile per le popolazioni batteriche che operano nel reattore.

Di seguito è descritto il procedimento di progettazione del sistema di tubi in PVC per il pre-riscaldo dell'ingestato.

Per le considerazioni fatte all'inizio del paragrafo si è deciso di considerare il numero di tubi installati n_T variabile, per riuscire a valutare eventuali mutamenti apprezzabili del bilancio energetico del sistema. In Tabella 5.9 è riportato, a titolo di esempio, il procedimento di dimensionamento dei tubi, nella ipotesi che essi siano in numero di 4 e che l'ingestato venga introdotto alle ore 7 della mattina (informazione di carattere gestionale e non di dimensionamento).

Dimensionamento dei tubi in PVC per il pre-riscaldo dell'ingestato			
Volume dei tubi per contenere l'ingestato	V_T	m^3	0.12
Lunghezza dei tubi	L_T	m	8.1
Area dell'unico tubo ideale	$A_{T\text{-}totale}$	m^2	0.0148
Numero di tubi installati	n_T		***4***
Raggio dei tubi	r_T	m	0.034
Diametro dei tubi	d_T	m	0.069
Superficie laterale dei tubi	$S_{laterale\text{-}T}$	m^2	6.990
Area efficace dei tubi in termini di schermo	A^*_T	m^2	2.225
Lunghezza caratteristica dei tubi	L^*_T	m	0.017
Spessore dei tubi	δ_T	m	0.003
Volume di PVC costituente i tubi	$V_{T\text{-}PVC}$	m^3	0.022
Massa di PVC costituente i tubi	$m_{T\text{-}PVC}$	kg	30.640
Ora in cui viene caricato l'ingestato nei tubi	$t_{ingestato\ tubi}$	h	***7***

Tabella 5.9 - Dimensionamento dei tubi in PVC per il pre-riscaldo dell'ingestato

1. Il volume interno dei tubi deve essere posto uguale al volume di ingestato che dovrà a regime essere alimento al reattore quotidianamente:

$$\boldsymbol{V_T = V_{ingestato}}$$

2. La lunghezza dei tubi è stata posta pari alla lunghezza dell'interno della serra, per sfruttare tutta la distanza longitudinale possibile:

$$\boldsymbol{L_T = L_{int}}$$

3. Come rapporto tra le due suddette grandezze è stata calcolata l'area dell'unico tubo *"ideale"*, ovvero l'area della sezione del tubo nel caso in cui si adottasse una configurazione con $n_T = 1$:

$$\boldsymbol{A_T = \frac{V_T}{L_T}}$$

4. Il raggio (e quindi il diametro) di ciascun tubo installato è stato calcolato in funzione di n_T con la seguente formula:

$$\boldsymbol{r_T = \sqrt{\frac{A_T}{n_T \cdot \pi}} \quad \rightarrow \quad d_T = 2 \cdot r_T}$$

5. La superficie laterale dei tubi, da cui dipende il trasferimento di calore convettivo con l'aria interna alla serra e successivamente con l'ingestato all'interno dei tubi stessi si calcola con la seguente formula:

$$S_{laterale-T} = n_T \cdot \pi \cdot d_T \cdot L_T$$

6. Considerando che i tubi hanno forma cilindrica regolare, e quindi sezione circolare, la proiezione del tubo su una superficie dipenderà essenzialmente dal suo diametro e dalla sua lunghezza. Questa osservazione è finalizzata al calcolo di un parametro geometrico, definito "area efficace" dei tubi, rappresentante la superficie di copertura che verrebbe mascherata dalla presenza dei tubi installati. Tale superficie riveste un ruolo importante nella definizione dei fattori di ombra e di vista tra i tubi e le superfici interne alla serra.

$$A_T^* = n_T \cdot d_T \cdot L_T$$

$$F_{vista_{T-i}} = F_{vista_{C-i}} \cdot \left(1 - \frac{A_T^*}{A_C}\right)$$

$$(F_{ombra-i})_{con\ tubi} = (F_{ombra-i})_{senza\ tubi} \cdot \left(1 - \frac{A_T^*}{A_C}\right)$$

7. Per il calcolo del fattore di scambio convettivo è necessario determinare la lunghezza caratteristica della superficie. Anche in questo caso si è optato per fissarla in termini di rapporto tra l'area ed il perimetro:

$$L_T^* = \frac{A_T}{2 \cdot \pi \cdot r_T \cdot n_T}$$

8. Lo spessore dei tubi δ_T , necessario per il calcolo del coefficiente di scambio conduttivo del calore attraverso la parete laterale dei tubi stessi, è stato scelto in funzione delle caratteristiche disponibili sul mercato, ed è pari a $2\ mm$.

9. Una volta noto lo spessore dei tubi è possibile quantificare il volume di materiale (PVC) impiegato:

$$V_{T-PVC} = [n_T \cdot \pi \cdot (r_T + \delta_T)^2 \cdot L_T] - V_T$$

10. Nota la densità del materiale (riportata nella Tabella precedente) si può calcolare la massa di PVC impiegato:

$$m_{T-PVC} = V_{T-PVC} \cdot \rho_{PVC}$$

A questo punto sono noti tutti gli elementi per impostare il calcolo della temperatura dei tubi ad ogni passo temporale k:

$$\boldsymbol{T_T^k = T_T^{k-1} + \frac{\Delta t}{m_{T-PVC} \cdot c_{P_{T-PVC}}} \cdot \sum_{j}^{N-1} q_{j-T}}$$

Dove:

$$\boldsymbol{\sum_{j}^{N-1} q_{j-T} = q_{Sole-T} + q_{V-T} + q_{S-T} + q_{N-T} + q_{E-T} + q_{O-T} + q_{G-T} + q_{C-T}}$$

$$\boldsymbol{= \tau_{\lambda_C} \cdot I_{t,T}(\phi)_C \cdot \alpha_{\lambda_T} \cdot A_T^* + h_{conv_{V-T}} \cdot S_{laterale-T} \cdot (T_V - T_T) + \sigma \cdot F_{vista_{T-S}} \cdot A_T^* \cdot \left(T_S^4 - T_T^4\right) + \sigma \cdot F_{vista_{T-N}} \cdot A_T^* \cdot \left(T_N^4 - T_T^4\right) + \sigma \cdot F_{vista_{T-E}} \cdot A_T^* \cdot \left(T_E^4 - T_T^4\right) + \sigma \cdot F_{vista_{T-O}} \cdot A_T^* \cdot \left(T_O^4 - T_T^4\right) + \sigma \cdot F_{vista_{T-G}} \cdot A_T^* \cdot \left(T_G^4 - T_T^4\right) + \sigma \cdot A_T^* \cdot \left(T_C^4 - T_T^4\right)}$$

Come si può notare dalla formula, anche per i tubi in PVC è stata adottata la semplificazione tale per cui tutti i materiali interni alla serra sono considerati come corpi neri (coefficiente di assorbimento e di emissione unitari).

Il dimensionamento dei serbatoi è del tutto analogo a quello dei tubi in PVC, chiaramente con le seguenti differenze:

- Il volume di ciascun serbatoio sarà pari al volume dell'ingestato alimentato giornalmente;
- La lunghezza massima del singolo serbatoio non potrà eccedere la metà della longitudine della parete Sud.

Non è parsa ragionevole l'implementazione degli scenari alternativi, suggerendo tale analisi in termini di proposta di miglioramento da valutare quand'ora il modello termico sia perfezionato. Le motivazioni che hanno spinto verso tale decisione sono molteplici:

- Limiti del modello, riscontrati durante la fase di calibrazione;
- Dubbi sulla reale efficacia del provvedimento:

    - L'installazione dei tubi in PVC all'interno della serra agevolerebbe il riscaldamento dell'ingestato, che assorbirebbe una determinata quantità di energia proveniente dal Sole e dalle superfici interne alla serra stessa. Tuttavia diminuirebbe inevitabilmente di una pari quantità, l'energia che nello scenario di funzionamento attuale raggiunge le superfici interne, compresa la geomembrana. Pertanto all'effetto positivo di pre-riscaldo si aggiungerebbe un effetto negativo di riduzione dell'apporto energetico

verso la geomembrana e quindi verso lo slurry contenuto nel reattore. Allo stato attuale il modello termico non è stato considerato in grado di apprezzare quantitativamente quale dei due fenomeni prevalga, poiché vi sarebbe il rischio di incorrere in erronee conclusioni non potendo distinguere un incremento reale di temperatura da una oscillazione del modello.

- La scelta di posizionare i serbatoi di pre-fermentazione dell'ingestato al di sopra della parete Sud, si scontra in prima battuta con le effettive capacità di resistenza strutturale dell'adobe e con il rischio di precoce deterioramento della parete a seguito delle operazioni di carico e scarico dei serbatoi stessi. A causa delle ridotte disponibilità economiche di una famiglia contadina dell'area andina, l'acquisto di un serbatoio in materiale metallico (buon conduttore termico) potrebbe risultare troppo oneroso, anche in relazione ai benefici che potrebbe trarne in termini di una ipotica maggiore produzione di biogas. Inoltre essendo il serbatoio all'aria aperta, necessiterebbe di un adeguato isolamento notturno, del tutto simile a quello predisposto per la serra. Infine la possibilità di miscelare manualmente il materiale contenuto nel serbatoio, oltre ad una non facile installazione, comporterebbe un aggravio gestionale per il fattore.

5.7. Conclusioni

Allo stato attuale il modello presenta una serie di limitazioni che non hanno reso possibili ulteriori analisi di dettaglio, le quali sono state suggerite come proposte di miglioramento. Le potenzialità degli sviluppi futuri sono strettamente legate alla quantità ed alla qualità dei dati a disposizione:

- disponibilità di una serie storica di dati di temperatura dell'aria ambiente, e degli elementi costituenti il sistema durante tutto l'arco dell'anno, per ottenere una calibrazione più accurata dei parametri di scambio termico;
- disponibilità di dati di sito più accurati per non dover ipotizzare troppe informazioni;
- utilizzo di un ambiente di calcolo più potente e performante rispetto ad Excel;
- disonibilità di più accurati dati di caratterizzazione chimica dell'ingestato, digestato liquido etc.;
- tenere in conto il reale funzionamento del reattore plug flow in contrapposizione al reattore di tipo CSTR;
- tenere in conto la dinamica dello spurgo della frazione solida del digestato che avviene con ridotta frequenza.

Il modello realizzato potrà essere associato a modelli biologici per valutare la produzione di biogas (ipotizzata in questo caso costante).

Le approssimazioni, anche notevoli che sono state introdotte nell'implementazione del modello termico, sono giustificate dal fatto che la tecnologia oggetto di studio è molto semplificata e che per sua prerogativa è rivolta ad un utilizzatore appartenente ad una comunità economicamente disagiata e con ridotte possibilità di accesso a strumentazione e materiali sofisticati. Conseguentemente all'artigianalità dell'installazione e alla relativa semplicità realizzativa, che non vincola l'utilizzatore ad essere supportato da personale tecnico (il che costituisce un aspetto positivo), potrebbero essere innumerevoli le imperfezioni durante il processo e gli inconvenienti generati da una cattiva pianificazione dei lavori. Tutti questi aspetti, chiaramente concorrono nel basso rendimento che questa tipologia di impianti può offrire. Va inoltre ricordato che principalmente il biogas prodotto viene impiegato, a valle del processo di desolforazione e di rimozione dell'umidità, direttamente come combustibile per sostituire le biomasse legnose. Tuttavia esiste la possibilità di utilizzare parte del biogas prodotto per alimentare un moto-generatore in grado di produrre energia elettrica, qualora vi fosse la necessità, come spesso accade nelle più remote comunità andine, dove la rete pubblica fatica a giungere. I cascami energetici del moto-generatore, potrebbero essere trasferiti sottoforma di calore nuovamente verso l'impianto, per avviare una fase di riscaldamento del reattore.

Come dimostrano i risultati ottenuti, il cammino per un efficientamento del processo e delle rese dell'impianto è ancora lungo. Questa tesi vuole offrire uno spunto di riflessione verso l'importanza di una corretta progettazione e gestione dell'impianto in via del tutto *passiva*, dal punto di vista energetico, ovvero senza l'impiego di fonti esterne che apportino calore verso il sistema (all'infuori chiaramente della radiazione solare).

- Il corretto orientamento dell'impianto (sia ad una falda che a doppia falda) per ottimizzare la potenza assorbita dalla radiazione solare durante tutto il corso dell'anno, in funzione anche della variabilità dei consumi di biogas: per esempio durante la stagione fredda vi saranno maggiori necessità di scaldare cibi o acqua.
- Il corretto dimensionamento del reattore e della serra che lo contiene. Aspetti come la profondità di interramento, il volume di aria interno alla serra, la superficie della cupola della geomembrana e la superficie del pelo libero dello slurry concorrono al raggiungimento delle condizioni ottimali di captazione dell'energia termica e del suo mantenimento entro i confini della serra. Di altrettanta rilevanza è il fattore di forma del digestore, da cui dipende il funzionamento secondo lo schema flusso a pistone.
- La corretta gestione dell'impianto in termini di orari in cui svolgere le mansioni più importanti. Valutare in funzione dei diagrammi dei percorsi solari, della durata del dì e dell'andamento delle temperature, quali siano i momenti migliori, per ogni giorno dell'anno, in cui alimentare l'ingestato, coprire e/o scoprire la serra con il telo di nylon.

Oltre a questi aspetti legati strettamente al sistema reattore-serra, vanno considerati gli aspetti a monte dell'alimentazione dell'ingestato. Sfruttando opportunamente la potenza radiativa solare, sarebbe possibile, implementare dei sistemi di pre-riscaldo e/o di pre-fermentazione del refluo, andando a migliorare la biodegradabilità dello stesso, prima ancora che sia introdotto all'interno del digestore.

L'implementazione sinergica, su entrambi i fronti, potrebbe di gran lunga migliorare le rese produttive e la stabilità del processo di digestione anaerobica.

Oltre agli aspetti più strettamente legati alla trasmissione del calore, l'incremento delle rese di produzione di biogas può essere ottenuto tramite una corretta scelta dei materiali impiegati. A riguardo è bene ricordare che per la natura stessa del progetto di cooperazione allo sviluppo, la tecnologia trasmessa alla comunità deve essere il più possibile replicabile attraverso l'utilizzo di materiali facilmente reperibili sul territorio e/o di basso costo.

Ovviamente tutte queste congetture ingegneristiche non possono prescindere da una adeguata formazione che deve essere impartita, e successivamente trasmessa e diffusa da pari a pari all'interno della comunità, al fine di ridurre al minimo quelli che possone essere errori gestionali evitabili. Presso l'impianto di Vilcambamba, per esempio, è capitato che "inavvertitamente" il personale addetto alla alimentazione dell'ingestato, caricasse il reattore con refluo di suino vaccinato. Un tale errore, derivante da una incomprensione di

fondo o da una mancata comunicazione, ha comportato un brusco abbattimento della biomassa attiva nel reattore – la quale è stata integrata inoculando il contenuto dei rumini bovini – e quindi ha determinato un arresto della produzione di biogas, arrecando evidenti disagi alla famiglia che vive presso la Granja Alfacancha. La fase di avviamento di un digestore anaerobico semplificato ha una durata dello stesso ordine di grandezza dell'HRT.

In ultima analisi, merita di essere fatto un appunto legato alla fattibilità economica di questi impianti. Al momento è difficile radicare questa nuova tecnologia rinnovabile nella comunità apurimeña, poiché l'economia della regione sta subendo un brusco cambio di rotta: da quella che era una vocazione agricola, la popolazione sta migrando verso il settore minerario, che garantisce una paga fissa e cospicua. Esistono combustibili alternativi alle biomasse legnose, come per esempio le bombole di GPL che possono essere acquistate ad una modica cifra, e che non implicano il lavoro in fattoria:

- Semina, irrigazione, raccolto di frutta e ortaggi;
- Cura degli animali stabulati;
- Raccolta del refluo;
- Attività connesse all'impianto di digestione anaerobica.

Queste sono solo alcune delle attività di routine del campesino tipo che decide di munirsi di un impianto PTD. Risulta pertanto evidente che, per risultare più "appetibile" tali impianti debbano garantire efficienze elevate e una sempre meno onerosa gestione. Solo così il costo del tempo e del lavoro verrebbe ammortizzato. In aggiunta andrebbe analizzato il modo migliore per la valorizzazione dei sottoprodotti generati dal processo, al fine di generare una forma di guadagno che andrebbe a ridurre i tempi di ammortamento dell'investimento iniziale di capitale economico, da parte del campesino.

Va anche fatto notare che per molte persone mangiare attornò ad un falò è la prassi: una abitudine molto radicata che si scontra con i bruciatori dei moderni fornelli, disposti per motivi impiantistici e di sicurezza a ridosso di una parete, e non certo al centro della stanza.

Allegati

Allegato A1: sensori e apparecchiature installate ed impiegate per il monitoraggio

Sensore di temperatura di tipo PT-100

- Sensore: in ceramica, tre fili - tipo Platinum 100 ohm – corpo adatto per movimento o vibrazione;
- Coefficiente di temperatura: 0.00385 (Ohm / ° C);
- Temperatura di esercizio: - 20 ° C - 100 ° C;
- Grado di precisione: CLASSE B - STANDARD IEC 751;
- Materiale: Acciaio Inox SS316, di diametro 1/4 " e lunghezza 3" (pollici);
- Con 10 m di cavo su tre fili con rivestimento in PVC, rinforzato con tubo flessibile in acciaio inox.

Interfaccia ottica (USB / IR)

Marca: NOVUS
Modello: IR-LINK3
Riferimento: 8813099050

- Comunicazione a infrarossi con il PC usando l'interfaccia di comunicazione IrLink3 collegata alla Porta USB;
- Il software Logchart II consente la configurazione, la raccolta, la visualizzazione, l’analisi e l’esportazione dei dati.

Data logger a due canali

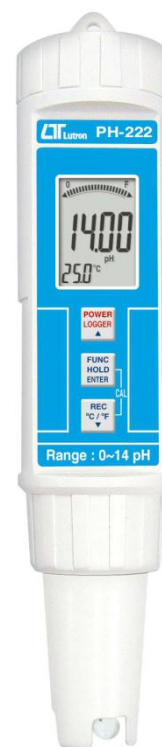
Marca: NOVUS
Modello: LogBox-AA
Riferimento: 8813002001
Origine: Brasile

Caratteristiche tecniche:

- Due ingressi universali, individualmente configurabili per Pt100, Termocoppia (tipo J, K, T, E, N, R, S o B), tensione (0 - 50 mV o 0 - 10 V), o corrente (0 - 20 mA o 4 - 20 mA);
- Precisione: 0,2% del range massimo di misura per Pt100, sia in tensione che in corrente;
- Risoluzione di ingresso: 14 bit;
- Inizio di acquisizione immediata o programmabile;
- Fine delle acquisizioni determinato per memoria piena, fissando data e ora o il numero di acquisizioni, o predisponendo l'opzione memoria circolare;
- Ripetizione quotidiana delle acquisizioni;
- 64 Kb di memoria per 64.000 record di un singolo canale o 32.000 record per ognuno dei 2 canali;
- Comunicazione a infrarossi a distanze fino a 1 m;
- Intervallo tra i record: programmabile da 1 s a 18 ore;
- Orologio in tempo reale;
- Alimentazione interna al litio 3.6 V (1/2 AA);
- Stima della durata della batteria: 200 giorni, facendo una raccolta di dati settimanali e con acquisizione dell'intervallo di 5 minuti;
- Circuito di commutazione per l'alimentazione di trasduttori esterni;
- Software di configurazione e raccolta dati: Windows ® 98, XP, 2000 e PalmOS;
- Temperatura di funzionamento: - 40 ° C a 70 ° C;
- Dimensioni: 70 x 60 x 35 mm.
- Software LOGCHART II

pH-metro

Caratteristiche principali del modello pH-222 della Lutron

<table>
<tr><td>Display</td><td colspan="2">LCD 20 mm x 28 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Range di misurazione</td><td>pH</td><td>0 – 14</td></tr>
<tr><td>Temperatura</td><td>-5°C – +80°C</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Risoluzione</td><td>pH</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td>Temperatura</td><td>0.1°C</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Accuratezza</td><td>pH</td><td>+/- 0.02</td></tr>
<tr><td>Temperatura</td><td>+/- 0.8°C</td></tr>
</table>

Il pH-metro tascabile Lutron è impermeabile (resistente agli spruzzi d'acqua) e misura in maniera rapida e precisa il valore di pH e la temperatura dove entrambi i valori vengono visualizzati contemporaneamente sul display. Ha taratura automatica tramite la tastiera a membrana (e non per mezzo di viti). Questo pH-metro ha un elettrodo integrato all’elettronica e i valori di misurazione di pH sono indicati con la compensazione di temperatura automatica realizzata.

- Visualizzazione simultanea del valore pH e temperatura: non è necessario avere un termometro separatamente;
- Compensazione automatica della temperatura (ATC) nell'intervallo -5°C / + 80 ° C;
- Indicazione di temperatura (° C, ° F) min, max e conservazione della funzione di dati (Data-Hold);
- Registratore dati di 100 valori (recuperabili su schermo);
- Impermeabile secondo IP 67;
- Calibrazione automatica;
- Spegnimento automatico;
- Viene accompagnato da due soluzioni tampone (4 e 7) 30 mL: la calibrazione avviene all’interno di un contenitore di 500 mL.

Contatore compatto a membrana BK-G 1.6 per installazioni domestiche

Il contatore BK-G1.6 è un misuratore a membrana sintetica con corpo in alluminio pressofuso. È stato progettato per una portata massima di 2,5 m^3/h e pressione di esercizio di 1,0 bar.

Caratteristiche principali:

- Controllo dell'apertura della curva durante l'impostazione in fabbrica, che permette di controllare la planarità della curva di errore, attraverso un indice su una scala graduata. In questo modo può soddisfare i più alti requisiti di taratura richiesti nei regolamenti.
- Basso coefficiente di attrito tra gli elementi di distribuzione, frutto di un'attenta progettazione che ha consentito di ridurre le dimensioni dei canali di distribuzione e delle valvole. In questo modo si ottiene una bassa suscettibilità alla contaminazione del sistema di distribuzione del misuratore, il cui risultato è quello di aumentare la stabilità della curva di errori di misura nel tempo, anche in condizioni di portata minima.
- Le membrane assemblate e tarate in modo pressurizzato, assicurano una bassa perdita di carico e minima emissione di rumore.
- Il design, materiali e componenti garantiscono i più alti standard di qualità del dispositivo.

Prestazioni:

Quattro camere di misurazione, simmetriche a due a due, sono separate da membrane sintetiche. Le camere sono riempite e svuotate alternatamente. Il movimento alternato delle membrane mette in rotazione un albero eccentrico, che regola il movimento delle valvole di distribuzione, per il riempimento e lo svuotamento delle camere di misura. Il movimento dell'albero eccentrico viene trasmesso, attraverso la catena cinematica, all'integratore del dispositivo dove si indica il volume di gas che ha attraversato l'unità nelle condizioni di funzionamento.

Allegato A2: diagrammi dei percorsi solari

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: −13.71; Long: −72.39
(Solar) time zone: −5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
West <-- Solar Azimuth --> East
Solar Elevation

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Feb 12
11 AM
10 AM
9 AM
8 AM
7 AM
6 AM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
6 PM
12
West <-- Solar Azimuth --> East
Solar Elevation
180°
150°
120°
90°
60°
30°
0°
-30°
-60°
-90°
-120°
-150°
90°
80°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°

12 PM
11 AM
1 PM
10 AM
2 PM
Feb 13
9 AM
3 PM
8 AM
4 PM
7 AM
5 PM
6 AM
6 PM
(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Solar Elevation
90°
80°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
-150°
-120°
-90°
-60°
-30°
0°
30°
60°
90°
120°
150°
180°
West <-- Solar Azimuth --> East

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Mar 21
6 AM
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
12 PM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
6 PM
Solar Elevation
West <-- Solar Azimuth --> East

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Jun 21
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
12 PM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
West <-- Solar Azimuth --> East
Solar Elevation

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: −13.71; Long: −72.39
(Solar) time zone: −5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Jul 16
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
12 PM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
Solar Elevation
West <--- Solar Azimuth ---> East
90°
80°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
180°
150°
120°
90°
60°
30°
0°
−30°
−60°
−90°
−120°
−150°

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: −13.71; Long: −72.39
(Solar) time zone: −5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Jul 22
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
12 PM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
West <–– Solar Azimuth ––> East
Solar Elevation

Solar Elevation
90°
80°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
180°
150°
120°
90°
60°
30°
0°
−30°
−60°
−90°
−120°
−150°
West <–– Solar Azimuth ––> East
6 AM
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
12 PM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
6 PM
Sep 22
(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: −13.71; Long: −72.39
(Solar) time zone: −5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: ETO
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Solar Elevation
West <-- Solar Azimuth --> East
Oct 29
Oct 29
12
6 AM
7 AM
8 AM
9 AM
10 AM
11 AM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
6 PM
90°
80°
70°
60°
50°
40°
30°
20°
10°
180°
150°
120°
90°
60°
30°
0°
-30°
-60°
-90°
-120°
-150°

Solar Elevation
West <--- Solar Azimuth ---> East
(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: -13.71; Long: -72.39
(Solar) time zone: -5
Vilcabamba, Grau
Apurimac, Peru
Dec 22
12
11 AM
10 AM
9 AM
8 AM
7 AM
6 AM
1 PM
2 PM
3 PM
4 PM
5 PM
6 PM

Allegato A3: condizioni meteo-climatiche dell'area oggetto di studio

Grafico A3.1 – Andamento dell'umidità relativa misurata presso la stazione meteo di Chuquibambilla

Grafico A3.2 – Andamento velocità del vento misurata presso la stazione meteo di Chuquibambilla

Allegato A4: schema dell'impianto

Riferimenti bibliografici

http://www.utopie.it/ecologia/tecnologie_appropriate.htm

Apurimac Onlus con le aziende Venerdì, 28 settembre 2012

Anand, R.C., Singh, R., 1993. A simple technique: charcoal coating around the digester improves biogas production in winter.Bioresour. Technol.45, 151–152.

Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., and Dewil, R. (2008) Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Progress in Energy and Combustion Science 34(6): 755-781.

Attar, Y., Mhetre, S.T., Shawale, M.D., 1998. Biogas production enhancement by cellulytic strains of Actinomycetes.Biogas Forum I (72), 11–15.

Bansal, N.K., 1988. A Techno-economic assessment of solar assisted biogas systems.Energy Res.10, 216.

Bardiya, N., Gaur, A.C., 1997. Effects of carbon and nitrogen ratio on rice straw biomethanation.J.Rural Energy 4 (1–4), 1–16.

Barnett, A., 1978. Biogas technology in the third world.

Batstone, D. J., Keller, J., Newell, R. B., and Newland, M. (2000) Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. I: model development, Bioresource Technology, Elsevier Science Ltd., 75(1): 67-74.

Batstone et al., (2002) The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).

Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C. and Cecchi, F. (2006). Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: The experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). Water Sci Technol, 53, 203–211.

Brummeler, E.T., Aarnink, M.M.J., Koster, I.W., 1992. Dry anaerobic digestion of solid organic waste in a biocell reactor at pilot plant scale.Water Sci. Tech.25 (7), 301–310.

Campbell, G. S., Norman, J. M. An introduction to environmental biophysics, Springer-Verlarg New York Inc., 1998.

Chandra, R., Gupta, R.S., 1997. Effect of pectin on anaerobic digestion of distillery effluent and biomethanogenesis in fed batch reactor.Indian J.Environ.Protect.17, 19–23.

Chen, Y., Cheng, J. J., and Creamer, K. S. (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: A review, Bioresource Technology, 99(10): 4044-4065.

Chowdhry, S.D.R., Gupta, S.K, Banergy, S.K., Roy Chowdhry, S.D., 1994.Evaluat ion of the potentiality of tree leaves for biogas production.Indian Forester 120 (8), 720–728.

Climent M, Ferrer I, Baeza MD, Artola A, Vazquez F, Font X. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chem Eng J. 2007;133:335–342.

Cohen J., Laporte J., Charpiliene A. & Scherrer, R. (1979). Activation of rotavirus RNA polymerase by calcium chelation. Archives of Virology 60, 177-186.

Cohen A, Breure AM, Andel JG van, Deursen A van (1980) Influence of phase separation on the anaerobic digestion of glucose I: Maximum COD-turnover rate during continuous operation. Water Res 14:1439–1448.

Dar, H.G., Tandon, S.M., 1987. Biogas production from pretreated wheat straw, lantana residue, apple and peach leaf litter with cattle dung.Biol. Wastes 21, 75–83.

das Neves LCM, Converti A, Penna TCV. Biogas production: new trends for alternative energy sources in rural and urban zones. Chemical Engineering and Technology 2009;32(8):1147–53.

Delgenes, J.P., Penaud, V., Moletta, R. 2002. Pretreatments for the enhancement of anaerotic digestion of solid wastes Chapter 8. In Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing, pp. 201-228.

Desai, C.K., 1988. Use of solar pond for thermal control of biogas plant.In: Proceedings of the National Seminar on Solar Energy and Rural Development, Kolhapur, May 29–31,

Dimpl E. Small-scale Electricity Generation from Biomass. Part II: Biogas., Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)-HERA; 2010.

Dutta S, Rehman IH, Malhotra PVRP. Biogas: the Indian NGO experience. New Delhi, India: Tata Energy Research Institute; 1997.

Eastman, J.A. and Ferguson, J.F. Solubilization of particle organic-carbon during the acid phase of anaerobic digestion. Journal Water Pollution Control Federation, v.53, n.3, p. 352-366, ago. 1981.

El Shinnawi, M.M., El Tahawi, B.S., El Houssieni, M., Fahmy, S.S., 1989.Changes of organic constituents of crop residues and poultry wastes during fermentation for biogas production.MIRCEN —J. Appl.Microbiol.Biotechnol. 5 (4), 475–486.

Fabbri C., Soldano M., Piccinini S. (2010) - L'agricoltore crede nel biogas e i numeri lo confermano. L'Informatore Agrario, 30: 63-67.

Ferrer Ivet, Ponsab Sergio, Vazquezc Felicitas & Font Xavier. (2008). Increasing biogas production by thermal sludge pretreatment prior to thermophilic anaerobic digestion. Biochemical Engineering Journal 42:186-192.

Geeta, G.S., Suvarna, C.V., Jagdeesh, K.S., 1994. Enhanced methane production by sugarcane trash pretreated with Phanerochaete chrysosporium.J.Microbiol. Biotechnol.9 (2), 113–117.

Ghosh, S., Henry, M.P., Sajjad, A., Mensinger, M.C., Arora, J.L., 2000. Pilot-scale gasification of municipal solid wastes by high-rate and twophase anaerobic digestion (TPAD). Water Sci. Technol. 41 (3), 101–110.

Ghyoot W, Verstraete W. (1997). Anaerobic digestion of primary sludge from chemical pre-precipitation. Water Sci Technol; 6-7:357-65.

Gollakota, K.G., Meher, K.K., 1988. Effect of particle size, temperature, loading rate and stirring on biogas production from castor cake.Biol.Wastes 24, 243–249.

Gujer, Zehnder (1983). Conversion processes in anaerobic digestion. Wat. Sci. Tech., 15: 127-167.

Gunaseelan VN. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. Biomass Bioenergy 2004;26:389–99.

He PJ. Anaerobic digestion: an intriguing long history in China. Waste Management 2010;30(4):549–50.

Idnani, M.A., Laura, R.D., 1971. Increased production of biogas from cowdung by adding other agricultural waste materials.J. Sci.Food Agric., 164–167.

ISAT/GTZ. Biogas Digest Volume I. Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ); 1999.

ISAT/GTZ. Biogas Digest Volume II. Biogas - Application and Product Development, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ); 1999.

ISAT/GTZ. Biogas Digest Volume III. Biogas - Costs and Benefits and Biogas – Programme Implementation, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ); 1999.

ISAT/GTZ. Biogas Digest Volume IV. Biogas – Country Reports, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ); 1999.

Itodo IN, Agyo GE GE, Yusuf P. Performance evaluation of a biogas stove for cooking in Nigeria. Journal of Energy in Southern Africa 2007;18(3).

Kalia, A.K., Singh, S.P., 1996. Performance evaluation of Pragati and KVIC biogas plant in hilly regions.Biogas Forum 64, 6–10.

Kugelman e McCarthy, 1964 Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment. J Water Pollut Cont Fed. 1964; 37: 97-116

Lallai A., Mura G., Onnis N. (2002) The effects of certain antibiotics on biogas production in the anaerobic digestion of pig waste slurry.

Lettinga, G., Van Velson, A.F.M., Hobma, S.W., De Zeeuw, W., Klapwijk, A., 1980. Use of upflow sludge blanket reactor for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechno l.Bioengg. XXII (4), 674–699.

Lissens G., Vandevivere P., De Baere L., Biey E.M., Verstraete W. Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. Water Science and Technology, 44, 91-102, 2001.

Madhukara, K., Nand, K., Raju, N.R., Srilatha, H.R., 1993. Ensilage of mango peel for methane generation.Process Biochem. 28 (2), 119–123.

Malik, R.K., Singh, R., Tauro, P., 1987. Effect of inorganic supplementation on biogas production.Biol.Wastes 21 (2), 139–142.

Malpei (1997) Digestione anaerobica. Manuale dell’ingegnere, Hoepli Ed. Q.4.8.2.

Malpei F., Gardoni D. (2007). La digestione anaerobica: i principi del processo biologico e i criteri di dimensionamento. In: Biogas da frazioni organiche di rifiuti solidi urbani in miscela con altri substrati (Renato Vismara, Francesca Malpei Ed.), Dipartimento di ing.idraulica, ambientale, infrastrutture viarie, rilevamento-sezione ambientale, Politecnico di Milano, 45-57.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., and Astals, S. Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modelling. Critical Reviews in Biotechnology, 2011; 31(2): 99–111.

Mechichi, T. and Sayadi, S. (2005) Evaluating process imbalance of anaerobic digestion of olive mill wastewaters, Process Biochemistry, 40(1): 139-145.

Molnar, L., Bartha, I., 1989. High solids anaerobic fermentation for biogas and compost production.Biomass 16 (3), 173–182.

Moorhead, K.K., Nordstedt, R.A., 1993. Batch anaerobic digestion of water hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content and inoculum volume.Bioresou r.Technol. 44 (1), 71–76.

Muller J.A. (2000). Pre-treatment processes for recycling and reuse of sewage sludge, Water Sci. Technol. 42:167–174.

Ni JQ, Nyns EJ. New concept for the evaluation of rural biogas management in developing countries. Energy Conversion and Management 1996;37(10):1525–34.

Nyns, E.J., 1986. In: Rehm, H.J., Reeds, G. (Eds.), Biomethanation Processes in Biotechnology, vol.8.VCH press, Weinheim (Federal Republic of Germany), pp.207–268.

Noone, G.P. (1990). The treatment of domestic wastes. In: A. Wheatley (ed), Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Elsevier Applied Science, London, pp. 139-170.

Omer AM, Fadalla Y. Biogas energy technology in Sudan. Renewable Energy 2003;28: 499–507.

Patel, V., Desai, M., Madamwar, D., 1993. Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation.Appl. Microbiol.Biotechno l. 42 (1), 67–74.

Plöchl M, Heiermann M. Biogas farming in central and northern Europe: a strategy for developing countries. Agriculture Engineering International 2006;8(8):1-15.

Pohland e Ghosh (1971) Anaerobic stabilization of organic wastes. Gober Gas Research Station . Ajitmal, Etawah (U.P.), India. 52 pp

Sanders, F.A., Bloodgood, D.E., 1965. The effect of nitrogen to carbon ratios on anaerobic decomposition.J. Water Pollut. Contr. Fed. 37, 1741.

Sasse L. Biogas Plants. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH; 1988.

Schievano A., D'Imporzano G., Adani F., (2006) Valutazione di un processo di digestione anaerobica: cinetica, rese di processo e stabilità biologica del digestato. Ecomondo 2006, in press.

Sharma, S.K., Mishra, I.M., Sharma, M.P., Saini, J.S., 1988. Effect of particle size on biogas generation from biomass residues.Biomass 17, 251–263.

Singh, R., Jain, M.K., Tauro, P., 1983. Pre-digestion to improve production of biogas from cattle waste.Agric.Wastes 6, 167–174.

Smith, S.R., Lang, N.L., Cheung, K.H.M., Spanoudaki, K. 2005. Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes. Waste Management, 25: 417-425.

Speece, R.E., Parkin, G.F., 1983. The response of methane bacteria to toxicity. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Anaerobic Digestion, Boston, MA.

Speece R.E. (1996) “Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters”. Archae Press.

SPOBD, 1979.Biogas Technology and Utilization.Chengdu Seminar, Sichuan Provincial Office of Biogas Development, Sichuan, P.R. China, 1979.

Somayaji, D., Khanna, S., 1994. Biomethanation of rice and wheat straw.World J.Microbiol. Biotechnol.10 (5), 521–523.

Sundrarajan, R., Jayanthi, A., Elango, R., 1997. Anaerobic digestion of organic fractions of municipal solid waste and domestic sewage of Coimbatore.Indian J.Environ. Health 39 (3), 193–196.

Tiedje, J.M. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. p. 179-244. *In* A.J.B. Zehnder (ed), Environmental Microbiology of Anaerobes. John Wiley and Sons, N.Y.

Tirumale, S., Nand, K., 1994. Influence of Anaerobic cellulolytic bacterial consortia in the anaerobic digesters on biogas production.Biogas Forum III (58), 12–15.

Tiwari, G.N., Chandra, A., 1986. Solar assisted biogas system: a new approach.Energy Conserv. Manage.26 (2), 147–150.

Tiwari, G.N., Rawat, D.K., Chandra, A., 1988. A simple analysis of conventional biogas plant.Energy Conserv. Manage. 28 (1), 1–4.

Van der Berg, L., Kennedy, K.J., 1983. Comparison of advanced anaerobic reactors.In: Proceedings of III International Conference on Anaerobic digestion, August 1983, Boston, NRCC no.22613.

Van de Graaf AA, de Bruijn P, Roberston LA, Jetten MSM, Kuenen JG (1996) Autotrophic growth anaerobic ammonium-oxidizing micro-organims in a fluidized bed reactor. Microbiology 142: 2187–2196.

Van Lier JB, Rebac S, Lettinga G (1997) High-rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions. Water Sci Technol 35: 199-206.

Vartak D.R., Ensler C.R., McFarland M.J. and Ricke S.C. 1997. Attached-film media performance in psychrophilic anaerobic treatment of dairy cattle wastewater. Bioresouorce Technology, 62 (1997) 79-84.

Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Lokshina, L.Y., 1996. A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. Bioresource Technol. 56 (2–3), 229–237.

Wang, Q., Kuninobu, M., Kakimoto, K., Ogawa, H.I., Kato, T., 1999. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment.Bioresour. Technol. 68 (3), 309–313.

WHO. Indoor air pollution. Retrieved 10th January 2011, from http://www.who.int/indoorair/en/ 2011.

Wilkie, A., Colleran, E., 1986. Pilot scale digestion of pig slurry supernatant using an upflow anaerobic filter.Environ.Lett.7, 65–76.